工學碩士 學位論文

# 다짐된 흙의 균열특성

## Crack Characteristics of Compacted Soils

## 指導教授 金泰亨

2007年2月 韓國海洋大學校大學院 土木環境工學科

## 鄭守廷

本 論文을 鄭守廷의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

- 委員長 工學博士 徐榮教(印)
- 委員工學博士 李重雨(印)
- 委員工學博士 金泰亨(印)

### 2007年 2月

## 韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科 鄭 守 廷

## Soo-Jung Jung

Department of Civil and Environmental Engineering Graduate School of Korea Maritime University

## Abstract

For quantitive measurement of the cracking behavior of soil, determining the tensile strength is one of simplest approaches. However, in geotechnical and geoenvironmental engineering practice, tensile strength of soil is assumed to be insignificant because it is a relatively small value compared with compression strength and the lack of a satisfactory measure. Thus, theoretical and experimental study of the unconfined penetration test (UP) method used to determine the tensile strength was conducted, and then the UP device and experimental procedure were modified to reduce the measurement errors and named as the Improved Unconfined Penetration (IUP) test. Using the IUP test, experiments were carried out to examine the variation in tensile strength as a function of disk diameter, loading rate and pH level. Results of the experiments provided the following important findings. The tensile strength increases with increase in the disk diameter. The disk diameter with 25.4mm is suitable for the IUP tests, because the specimen's failure pattern for this selected disk diameter satisfy the theory of perfect plasticity adopted in this study. The tensile strength is not sensitive to the loading rate in the range of  $0.1\%/\text{min} \sim 1.0\%/\text{min}$ . The ASTM recommendation for the axial strain for the unconfined compression

test is recommended. The tensile strength of specimen compacted with pH 9 of water is smaller than that of specimen compacted with for pH 3 and 6 of water. That is, with a low pH value, the higher the tensile strength, because a lower pH solution increases soil particle bonding stresses. The polluted pore fluid as reflected on pH solution affects the particle size and particle distribution trends. Especially, there are significant variations of the value of  $D_{10}$  causing pollution as reflected by pH solution. The tensile strengths obtained from the IUP test show a little lower values than those the split tensile test, but generally good agreement between two values is observed. Therefore, the IUP test is enough reliable for determination of the tensile strength of the compacted sand-bentonite mixtures. In addition, the results of this study can be usefully used for understanding the cracking behavior of compacted soils and also for design, construction, and maintenance of the geotechnical structures.

# 목 차

ABSTRACT i
LIST OF TABLES iv
LIST OF FIGURES vi
제 1 장 서 론
1.1 연구개발의 필요성
1.2 연구목표 및 내용
제2장 인장시험장치
2.1 기존의 인장시험방법9
2.2 개량일축관입시험법(IUP)
2.2.1 시험장치의 구성
2.2.2 기본이론
2.2.3 파괴메카니즘
2.3 개량일축관입시험기(IUP test)의 개선점
제 3 장 시료의 공학적 특성
3.1 화강풍화토-벤토나이트 혼합토
3.2 모래-벤토나이트 혼합토
3.3 시료의 물성실험
제 4 장 인장강도시험
4.1 시료준비
4.2 공시체 제작
4.3 시험방법
4.4 인장시험 결과 및 고찰

4.4.1 인장응력-변형률 관계	43
4.4.2 디스크의 영향	55
4.4.3 하중재하속도의 영향	60
4.4.4 신뢰성 확인	64

# 

5.1 지반의 오염문제
5.2 폐기물 오염원의 종류와 특성
5.3 시험 및 고찰
5.3.1 비중계분석
5.3.2 인장강도시험
5.3.3 균열패턴 관찰
제 6 장 결 론84
참고문헌

## LIST OF TABLES

Table 2.1	Standard compaction mold specification17		
Table 2.2	Standard compaction hammer specification18		
Table 2.3	Hydraulic sample ejector specification		
Table 2.4	Load frame specification20		
Table 2.5	Load cell specification21		
Table 2.6	Rated displacement specification		
Table 2.7	Data logger specification22		
Table 2.8	Proposed values of parameter K in Eq.(5)		
	(Fang and Fernandez, 1981)27		
Table 3.1	Specific gravity of materials		
Table 3.2	Atterberg limit of materials35		
Table 3.3	Summary of standard protor compaction test specifications		
Table 3.4	Maximum dry density and optimum moisture content of		
	materials37		
Table 3.5	Coefficient of permeability of materials		
Table 4.1	Characteristics of granite-bentonite mixtures		
Table 4.2	Characteristics of sand-bentonite mixtures40		
Table 4.3	Test procedure of granite-bentonite mixtures42		
Table 4.4	Test procedure of sand-bentonite mixtures42		
Table 5.1	Component and pH of leachate in municipal wastes landfill71		
Table 5.2	Component and pH of leachate in industrial wastes landfill72		
Table 5.3	Test procedure of hydrometer analysis with sand-bentonite		
	mixtures ······73		
Table 5.4	Test procedure for IUP tests on sand-bentonite mixtures77		
Table 5.5	Test procedure for cracking pattern tests on sand-bentonite		
	mixtures80		
Table 5.6	Comparison of basic parameters relating to soil structures		

## LIST OF FIGURES

Fig.	1.1	Schematic diagram illustrating typical settlement pattern and				
		associated cracking3				
Fig.	1.2	Cracking in highway embankment3				
Fig.	1.3	Tension crack with excavation-induced				
Fig.	1.4	Typical slope failure related to the cracking and tensile behavior				
		of soil5				
Fig.	1.5	Tensile cracks observed in the ground at India				
Fig.	1.6	Comparison between predicted shear active plane and actual failure				
		plane during test filling in Muar6				
Fig.	1.7	Attenuation landfill with double mineral base layer7				
Fig.	2.1	Test for tensile strength of hydraulic cement mortars9				
Fig.	2.2	Direct tensile test apparatus for measure tensile strength of $\mathrm{clay}\cdot 12$				
Fig.	2.3	Direct tensile test apparatus for measure tensile strength of				
		granular materials				
Fig.	2.4	Direct tensile strength test set up14				
Fig.	2.5	Split tensile test				
Fig.	2.6	Unconfined penetration, UP				
Fig.	2.7	Improved unconfined penetration test overall apparatus17				
Fig.	2.8	Specimen preparation set				
Fig.	2.9	Load frame set20				
Fig.	2.10	Data logger and computer set22				
Fig.	2.11	Modified Mohr-Coulomb failure criterion24				
Fig.	2.12	Cross section and velocity relation of the UP test				
Fig.	2.13	Improved unconfined penetration test29				
Fig.	3.1	General landfill				
Fig.	3.2	Structural units of clay minerals				
Fig.	3.3	Atom structure of montmorillonite				
Fig.	3.4	Diagrammatic sketch of the structure of montmorillonite				

Fig. 4.1 Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 0) ------ 44-45 Fig. 4.2 Fig. 4.3 Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 15) ------ 46-47 Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 30) ------ 48-49 Fig. 4.4 Fig. 4.5 Fig. 4.6 Fig. 4.7 Fig. 4.8 Fig. 4.9 Failure modes of specimen in the IUP tests (Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI)=15) ------59 Fig. 4.10 Loading rate and disk diameter effects Fig. 4.11 Comparison of tensile strength of various Fig. 5.1 Fig. 5.2 Fig. 5.3 Fig. 5.4 Wrinkle phenomenon of geosynthetic-clay liner connection by Failed connection of geomembrane ......70 Fig. 5.5 Fig. 5.6 Effect of pH level on hydrometer analysis ......74-75 Fig. 5.7 Fig. 5.8 Effect of pH level on tensile strength in the IUP test ......78-79 Fig. 5.9 Fig. 5.10 Preparation of wet mud pad for conducting cracking 

### 제1장 서론

#### 1.1 연구개발의 필요성

지반구조물의 대부분은 토공작업에 의해 형성되어 다짐된 상태이다. 이러한 다져진 흙에서는 지반침하, 재하하중, 온도변화, 함수비 변화, 다짐시 에너지불 균형 배분 등에 의하여 균열이 발생하게 되는데 생성된 균열은 초기 파괴 및 진행성 파괴를 유발하게 되어 궁극적으로 구조물 전체의 안정을 위협하게 된 다. 지반의 균열은 흙의 인장강도와 밀접한 관련이 있음을 고려해 볼 때 흙의 인장강도는 지반공학 및 지반환경공학분야에서 중요한 강도변수 중 하나이다. 하지만 많은 지반공학자와 지반환경공학자들은 흙의 인장강도가 압축강도와 비 교하면 상대적으로 그 값이 작고, 적합한 인장력 측정법의 결여로 인한 신뢰할 수 있는 데이터의 부족으로 영에 가깝다고 생각하거나 무시하고 있다. 하지만 흙의 인장특성에 관한 이전의 연구들을 살펴보면 인장강도의 중요성을 충분히 알 수 있다. 특히, 세립토가 포함된 자연 혹은 인공적인 지반구조물 경우 흙의 인장특성은 대단히 중요한 요인이 될 수 있다. 왜냐하면 세립토는 주변환경적 인 요인에 민감하기 때문이다.

도로포장 및 흙 댐의 경우 재료의 인장강도와 관련된 균열파괴의 중요성은 이미 많은 관심을 불러 일으켰는데, 1963년 Leonards and Narain은 흙 댐에서 의 균열거동 문제를 언급하였으며(Fig. 1.1) George(1970)는 안정화된 흙-시멘 트 혼합체의 균열 확장 및 균열의 효과에 대해 언급을 하였다. Fig. 1.2의 경우 도로제방상단에 균열이 발생하여 사면의 파괴에 이르는 모습을 나타내고 있다 (양태선, 2005). Suklje(1969)은 피압수로 인한 굴착면 저면의 점성토층에서의 위험한 인장균열 가능성과, 점성토 저면의 한계동수경사가 전단강도 뿐만 아니 라 인장강도에 영향을 받을 수 있다고 지적했다. Fig. 1.3은 조태진 등(2004)이 해석한 동해고속도로 건설현장의 개착과정에서 발생된 인장균열의 모습을 나타 내고 있다. 또한, Spencer(1968)와 Suklje(1969)은 사면상부에서 나타나는 인장 주응력상태를 갖는 크리프나 한계상태의 점성토사면의 경우 인장강도가 사면안 정해석과 깊은 관련 있음을 밝혔다. Fang and Fernandez(1981)도 도로, 사면, 흙 댐 및 제방에서의 인장균열 문제의 중요성을 언급하였다. Fig. 1.4의 경우, 콜롬비아의 북쪽에 위치한 Bucaramanga 사면에 인장균열이 발생한 모습이며 (Fang, 1997), Fig. 1.5는 인도 Chamoli 지역과 Nandaprayag 지역에서 발견된 인장균열 모습이다(Irene, 2004). 이러한 균열들은 단계적으로 표면 크리프를 일 으키게 되며 결국은 사면의 파괴를 유발한다. Kim and Sture(2004)도 불포화 흙의 정확한 거동해석에 있어 인장강도의 중요성을 지적하였다.

균열은 예측된 바와는 다른 파괴를 야기시킬 수 있다는 것을 보여준 실례로 말레이시아 Muar지역의 경우를 들 수 있다(Brand and Premchitt, 1980). 1980 년 말레이시아도로공단(MHA)은 연약한 해성점토층이 10 ~ 20m 두께로 분포 하고 있는 말레이시아 남부의 Muar에서 시험 성토를 실시하면서, 이 분야의 여러 저명한 학자들을 초청하여 시험 성토 지반의 시공 중 변위, 간극수압과 파괴 양상을 예측하고 현장 계측 데이터를 분석하였지만 그림 3에서 보는 바와 같이 지반의 실제 거동은 예측된 바와는 다소 상이하게 나타났다(Brand and Premchitt, 1980). 이와 같이 성토고가 원지반의 한계값보다 작은 저성토 시공 의 경우에 대규모 전단 파괴의 경향은 단순한 원호활동 형상을 나타내기보다는 인장균열이 상부지표면에 발생된 후 원호파괴면이 형성되는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 상황을 고려해 볼 때 다져진 재료의 인장강도를 정확히 측정 하고 평가하는 것이 요구된다.

Allen(2001)은 지반환경구조물의 대표적인 사례인 매립지 차단시스템에서 균 열이 발생하게 되면 그 기능이 상실되어 오염원이 유출된다는 것을 지적하였다 (Fig. 1.6). 이것은 이들 매립지를 건설할 때 매립지 전체구조물의 안정에 대한 검토는 흙의 전단강도 특성을 기초로 해서 충분히 이루어졌지만, 차단재로 사 용된 세립토의 균열에 대한 검토와 오염원이 세립토에 미치는 영향을 충분히 고려하지 않았기 때문이다. 이미 널리 알려진 바와 같이 오염된 간극수는 전기

- 2 -

전도도, 부피변화, 압축성 그리고 전단강도에까지 영향을 미치게 되어 모든 이 온을 제거한 순수한 물일 경우와는 다른 흙의 거동을 일으키게 된다(Evan and Fang, 1986; Naik, 1986; Meegoda and Rajapakse, 1993; Fernandez and Quigley, 1988). 오염원의 영향과 함께 매립지 내부의 온도상승(50℃)이 차단시 스템 균열의 주 원인으로 알려지고 있다.



Fig. 1.1 Schematic diagram illustrating typical settlement pattern and associated cracking(Leonards and Narain, 1963)



Fig. 1.2 Cracking in highway embankment(Yang, 2005)



(a) Failure plane of tensile crack



(b) Formation of wedge failure

Fig. 1.3 Tension crack with excavation-induced(Cho et al., 2004)



(a) Developing cracks

(b) Slope failure



(c) Sketch shows the tensile failure of earth slopes



(d) Photo shows a close view

Fig. 1.4 Typical slope failure related to the cracking and tensile behavior of soil(Fang, 1997)



Fig. 1.5 Tensile cracks observed in the ground at India(Irene, 2004)



Fig. 1.6 Comparison between predicted shear active plane and actual failure plane during test filling in Muar(Brand and Premchitt, 1980)



Fig. 1.7 Attenuation landfill with double mineral base layer (Allen, 2001)

### 1.2 연구목표 및 내용

앞에서 살펴본 바와 같이 중요한 흙의 특성 중 하나인 균열특성을 규명하기 위해서 는 이를 정확히 측정할 수 있는 기법의 개발이 요구된다. 현재 균열 특성을 파악할 수 있는 가장 간편한 방법으로는 인장강도를 산정하는 것이다. 이를 위해 흙의 인장강도를 측정하는 기존의 시험법을 고찰하여 각 방법의 장단점을 파악하여야 하는데, 본 논문에 서는 일축관입시험(UP)을 주 연구대상으로 선택하였다. 이는 일축관입시험을 이용한 실험방법이 간단하고 적용된 이론이 명료하기 때문이다. 일축관입시험에 대한 이론적 배경과 실험방법의 적합성을 살펴보고, 점착력이 있는 다짐토의 인장강도를 정확히 측 정할 수 있는 개선된 시험장치 및 기법을 제시하고자 한다.

개발된 시험기를 사용하여 우리나라에서 가장 흔하게 볼 수 있는 화강토와 일반 토 질실험에서 많이 사용되는 주문진 표준사 및 벤토나이트를 혼합한 시료에 대한 인장강 도를 측정하고 또한 하중재하속도 및 재하디스크의 크기 등이 인장강도에 어떠한 영향 을 미치는지 파악하여 각 혼합토의 인장특성을 규명하고자 한다. 또한, 오염원이 흙의 인장균열에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 폐기물매 립지의 점토차수재로 많이 사용되는 모래-벤토나이트 혼합토를 pH를 달리한 혼합수에 대한 인장강도변화, 비중계분석 및 균열패턴 시험을 실시하고자 한다.

본 연구결과는 세립토가 포함되어 있는 지반의 균열을 이해하는 자료로서의 활용과 지반구조물의 설계, 시공 및 유지관리에도 이용될 수 있을 것이라 기대된다.

## 제 2 장 인장시험장치

#### 2.1 기존의 인장시험방법

오늘날 흙의 전단강도를 측정하기 위해 개발된 시험방법은 이미 매우 발달된 단계에 도달하였지만, 흙의 인장강도 측정을 위한 시험장치 및 기법은 매우 미 비한 실정이다. 지금까지 인장강도를 측정하기 위해 개발된 시험방법을 살펴보 면 Tschebotarioff et al.(1953)과 Winterkorn(1955)이 개조된 Briquette Gang Model 형태의 시험기(Fig. 2.1)를 점토의 인장강도를 측정하기 위해 개발하였으 며, Leonards and Narain(1963)은 Beam 형태의 인장강도 측정장치방법을 제안 하였다.





(c) Tensile test apparatus

Fig. 2.1 Test for tensile strength of hydraulic cement mortars (Park, 2000)

흙의 인장강도는 직접인장시험방법과 간접인장시험방법으로 측정되어질 수 있다. 과거 여러 공학자들이 흙의 직접인장시험장치들을 제작한 바 있다. Conlon(1966)은 평균 액성한계가 22이고 소성지수가 4인 연약한 점토질 실트 (하구지역 퇴적물)에 대하여 일축인장실험을 수행하였다(Fig. 2.2(a)). 공시체는 중앙부 위치에서 파괴를 유도하고 네킹현상(Necking effect)를 감소시키기 위하 여 중앙부분의 직경이 좁게 제작되었다. 공시체의 각 끝은 원통모양의 클램프 로 잡아주게 되는데 클램프의 안쪽은 공시체가 미끄러지지 않게 하기 위하여 사포를 대어준다. 또한, 인장력이 적용되는 동안 편심을 줄이기 위하여 공시체 의 양 끝에는 볼과 소켓이 사용되어졌으며 7.65cm 높이의 공시체를 사용한 인 장테스트에서는 0.0254cm의 축변형에서 약 16.6kPa의 최대 인장강도를 나타냈 다. 이 시험장치는 공시체에 있어서 인장력이 가해지는 유효한 길이를 정확하 게 알 수 없다는 단점을 가지고 있어, 그 변형측정값을 신뢰하기가 어렵다. 또 한 단면이 일정하지 않은 공시체를 실험에 사용하므로 응력분배가 일정치 않을 뿐만 아니라, 공시체의 미끄러짐도 문제가 되었다.

Bishop and Garge(1969)는 인장강도를 산출하기 위하여 공시체의 끝을 잡아 당기는 것을 대신하여 구속압력을 사용하였다. 실험에 사용된 공시체는 구속응 력이 증가하게 되면 공시체의 위와 아래 부분을 밀어주게 되어 중앙부분에 인 장력이 가해지도록 중앙부분의 직경이 좁게 만들어진 것을 사용하였다. Bishop and Garge은 75의 액성한계와 46의 소성지수를 가지는 London Blue clay에 대 하여 인장실험을 수행하였는데 축인장변형률 2.2% ~ 16.7%의 파괴범위에서 26.6kPa ~ 33.2kPa의 인장강도를 나타내었다. Fig. 2.2(b)에서 보는 바와 같이 14.24cm 높이와 2.54 ~ 1.27cm 직경의 공시체는 삼축장치를 활용하여 시험되 어졌다. 이 시험장치는 비교적 점토의 정확한 인장강도를 얻을 수 있지만, 공시 체의 중앙부분 즉 직경이 좁아진 부분에서만 인장력이 가해질 뿐, 공시체의 나 머지 부분에는 압축력이 가해지므로 정확한 변형률 측정이 어렵다는 단점이 있 다.

1970년, Bofinger는 7.74cm × 7.74cm의 단면과 30.48cm의 길이를 가지는 사

각기둥모양의 공시체를 사용하여 직접인장시험을 실시하였다(Fig. 2.2(c)). 시험 에 사용된 시료는 53의 액성한계와 33의 소성지수를 가지는 Harmondsworth -Brickearth점토를 8% ~ 10%의 시멘트와 혼합하여 준비하였다. 이 장치를 이 용하여 얻은 응력-변형률 곡선은 보통의 압축테스트에서 보여지는 볼록한 모양 과는 반대로 위로 오목한 곡선을 나타내었다. 공시체의 끝은 급결 폴리에스테 르 수지를 사용하여 강판들에 접착되었고 인장력은 공시체의 끝이 회전의 영향 을 줄이기 위하여 구면 배열로 결합된 캡을 통해 시험하였다. 공시체의 끝을 고정시키는 것을 대신하여 측판들을 접착시킨 이 장치는 Conlon의 장치와 연 관하여 보면, 응력집중의 효과를 감소시키는 장점이 있기는 하지만, Conlon의 장치가 가지는 단점들(변형률 측정과 미끄러짐 문제)을 여전히 내포하고 있다.

Perkins(1991)는 입상재료인 MLS-1(Minnesota Lunar Simulant)의 인장강도 를 측정하기 위한 직접인장장치를 개발하였다. 이 장치는 직접인장장치의 응력 집중, 편심과 같은 전형적인 단점들을 전반적으로 개선한 것으로 동일한 2개의 반쪽으로 쪼개어지는 17.8cm × 17.8cm × 17.8 cm의 박스 안에 정육면체 시험 편을 넣도록 설계되어졌다(Fig. 2.3(a)). 정면 쪽의 반쪽은 상자의 바닥에 8.89cm의 roller bearing block을 부착함으로써 측면의 가이드 레일 위에 올려 졌다. 박스의 배면 쪽 반쪽은 레일과 블록 조립에 의해 지지되어지는 정면 쪽 반쪽과 같은 높이에 놓기 위하여 2개의 견고한 알루미늄 블록위에 얹혀졌다. 모터와 로드셀 조립은 바닥판 위에 올려졌으며 로드셀은 또한 정면 쪽 박스에 부착되어졌다. 시험결과는 정면 쪽 박스의 변위 대 파괴의 연직면에서의 평균 응력으로 나타내어지는데 파괴면에서의 평균 수평응력은 공시체 내부의 측면 토압 때문에 테스트의 초기에는 압축이다. MLS-1로부터 얻어진 결과는 인장강 도의 정확한 값을 나타내지는 않았고 단지 인장강도가 1.0kPa보다 크지 않다는 단계만을 보여주었다. Perkins는 또한 상대적으로 간단한 다른 인장테스트(불구 속 인장시험으로 칭하여지는)를 수행하였는데 그 시험결과는 인장강도가 0.05kPa ~ 0.07kPa의 범위 내에서 변화한다는 것을 나타내었으며 이러한 인장 강도는 입자들의 인터락킹(Interlocking)에 의한 것으로 판단된다.



(c) Bofinger's apparatus(1970)





(a) Perkins's apparatus(1991)



(b) Mikulitsch and Gudehus's apparatus(1995)

## Fig. 2.3 Direct tensile test apparatus for measure tensile strength of granular materials

Mikulitsch and Gudehus(1995)는 Perkins에 의해 개발된 것과 유사한 직접인 장 장치를 설계, 제작하였다(Fig. 2.3(b)). 기울어지게 제작된 벽들은 공시체를 제자리에 유지하도록 하였으며, 한 쌍의 벽은 고정되어 있고 다른 벽들은 ball-bearing 위에 놓여져 당겨진다. 줄에 의해 걸리는 버킷 안으로 물이 천천 히 채워지는 것에 의해 힘이 증가되어진다. 공시체는 Perkins의 장치로 시험할 때와 같이 두 개의 갈라진 틈 사이의 균열을 통하여 2개의 반쪽들로 파괴되었 다. 이 장치와 Perkins에 의해 개발된 장치 사이의 가장 큰 차이점은 시험편과 박스 사이의 접촉을 용이하게 하여 인장력을 촉진시키는 기울어진 경사면이다. Mikulitsch and Gudehus는 이 장치를 이용하여 모래, 실트, 황토에 대하여 직 접인장테스트를 수행한 바 있다. 국내의 경우 김광우 등(2002)이 개질 샌드 아 스팔트 혼합물의 인장강도 연구를 위하여 Fig. 2.4와 같은 가운데 부분이 오목 한 공시체(Slender specimen)를 제작하여 가운데 부분에서 파괴가 일어나도록 하였다. 또한 공시체에 하중 재하시 노치(Notch)를 만들지 않고 단면 변화의 충격을 줄이기 위해서 단면 변화 부분에 곡률(Round)를 주어 제작하였으며 본 드 접착없이 공시체 측면을 고정하여 실험하는 방법을 개발하였다.



Fig. 2.4 Direct tensile strength test set up(Kim et al., 2002)

이러한 직접인장시험장치들은 응력집중, 미끄러짐 문제, 공시체 제작의 어려 움 등의 문제를 가진다. 따라서 콘크리트, 역청콘크리트, 석회로 안정화된 흙, 안정화된 쏘일 시멘트 등은 간접인장시험장치인 할렬인장시험(split tensile test) 형태의 시험기를 사용하여 인장강도 측정을 하였다(Breen and Stephens, 1966; Thompson, 1965). 할렬인장시험방법은 직접인장 시험방법과 달리 특별한 장치를 필요로 하지 않고, 간단히 인장강도를 측정할 수 있기 때문에 우리나라 에서도 KS F 2423에 표준인장 시험방법으로서 규정하고 있다(Fig. 2.5(a)). 할 렬인장시험은 압축강도시험의 경우와 마찬가지로 한 쪽이 구좌(球座)로 이루어 진 것을 사용하고 공시체는 가압판 위에 Fig. 2.5(b)와 같이 설치한다. 이 경우 가압판과 공시체는 직접 접촉하도록 하고 양자 사이에 틈이 생기지 않도록 한 다. 하중은 공시체에 충격을 주지 않도록 일정하게 가하고 재하속도는 매분 7 ~ 14kgf/cm<sup>2</sup>로 일정하게 한다(박승범, 2000).



(a) Split tensile test set up



(b) Test cross-section(Park, 2000)

Fig. 2.5 Split tensile test

그 외 Chen(1970)은 콘크리트의 인장강도를 측정할 수 있는 또다른 간접인장 시험장치인 새로운 양면펀칭시험(Double punch test)을 제시하기도 하였으며 Fang and Chen(1972)과 Fang and Fernandez(1981)는 양면펀칭시험방법을 이 론적, 실험적으로 흙에 적용시켜 Fig. 2.6과 같은 일축관입시험을 제시하였다 (Fang, 1997).



Fig. 2.6 Unconfined penetration, UP(Fang, 1997)

## 2.2 개량일축관입시험법(IUP)

#### 2.2.1 시험장치의 구성

본 연구에서 다짐된 혼합토의 정도 높은 변형특성과 인장강도를 측정하기 위 해 주 연구 대상인 일축관입시험기(Fig. 2.6)를 개량한 Fig. 2.7과 같은 시험기 를 사용하여 실험을 실시하였다. 전체 인장시험기는 크게 세 부분으로 구성되 어 있다. 공시체를 만드는 공시체 제작 세트와 인장시험기의 Load frame set, 그리고 보다 정확한 데이터값을 얻기 위한 기록장치(Date logger) 및 컴퓨터 세트로 이루어져 있다.



Fig. 2.7 Improved unconfined penetration test overall apparatus

공시체 제작세트는 시료를 일정한 규격으로 만들기 위한 다짐 몰드와 다짐 해머, 그리고 다져진 시료를 몰드에서 발취하는데 사용하는 시료 발취기로 구 성된다(Table 2.1 ~ 2.3, Fig. 2.8).

<i>Tuble 2.1 Standard Compaction mold specificatio</i>	Table	2.1	Standard	compaction	mold	specification
--	-------	-----	----------	------------	------	---------------

Items	Description	
Mold Dimensions	<i>Ф</i> 100×H127mm	
Construction	All steel : plated for rust resistance	
Collar	50mm	
Base Plate	$\Phi 178 \times 12 \text{mm}(\text{thick})$	
Clips	Welded to mold and collar	
Studs	Threaded: With wing nuts; welede to base plate	

Items	Description	
Hammer	$\Phi$ 50mm $\times$ 2.5kg	
Drop	300mm	
Guide Sleeve	Machined steel tubing	
	Holes for air pressure release	
Сар	Integrally spun into sleeve	
Construction	Machined steel: plated for rust resistance	

Table 2.2 Standard compaction hammer specification

Table 2.3 Hydraulic sample ejector specification

Items Description	
Application $\Phi 100, \Phi 150$ mm mold	
Jack Force	3 ton
Stroke	150mm
Operation	Hydraulic



(a) Standard compaction mold



(b) Standard compaction hammer



(c) Hydraulic sample ejector

#### Fig. 2.8 Specimen preparation set

인장시험기의 Load frame set는 로드셀과 다이알 게이지를 연결한 것으로 본 시험기 중 가장 중요한 부분이다(Fig. 2.9). 이것은 흙 및 다른 건설재료의 강도 시험을 할 수 있으며 모터를 수동과 자동 겸용으로 조정할 수 있다. 특히 0.001mm/min까지 loading 속도 조절이 가능하며 Load frame의 구체적인 사양 은 다음과 같다(Table 2.4 ~ 2.6).



(a) Load frame



(b) Load cell



e (c) Rated displacement Fig. 2.9 Load frame set

Table 2.4 Load frame specificate
----------------------------------

Items	Description	
Axial loading unit	Servo motor driven gear reduction system	
Capacity	Max 200kgf	
Loading speed	0.001 ~ 5 mm/min	
Speed display	Digital speed meter	
Speed control	Real time dynamic control(0.001 mm/min control)	
Sample adjust	Operated by hand using handle & screw nuts	
Motor	1.1 kw-servo motor	
Frame	All steel integrally welded construction	

Items	Description	
Rated Capacity (R.C.)	100kg	
Rated Output (R.O)	3mV/V±0.1%	
Non-Linearity	$\leq 0.1\%$ R.O.	
Hysteresis	$\leq 0.1\%$ R.O.	
Non-repetability	$\leq 0.1\%$ R.O.	
Creep error	$\leq$ 0.1% in 20min	
Zero Balance	$\leq 0.1\%$ R.O.	
Compensated temperature range	$-10 \sim 70 $ °C	
Operating temperature range	$-20 \sim 80 $ °C	
Temp.effect on rated output	$\leq 0.05\%$ Load/10 °C	
Temp.effect on zero output	$\leq 0.05\%$ R.O/10 °C	
Teminal input resistance	$350\Omega\pm3.5\Omega$	
Teminal output resistance	$350\Omega\pm5\Omega$	
Insulation resistance (min)	2000M $M\Omega$ at 50V DC	
Excitation Voltage	10V(Recommended), 15V(Maximum)	
Electrical Connection	$\Phi$ 9mm×3m(22AWG×4Core shielded)	
Protection Class	Meets IP 67	
Safe overload	150% R.C	
Ultimate Overload	300% R.C	

Table 2.5 Load cell specification

Table 2.6 Rated displacement specification

Items	Description
Rated Displacement	10mm
Rated Output (mV/V)	1.5(or 3000×0.000001)%
Non-Linearity (%F.S.)	0.5
Hysteresis (%F.S.)	0.5
Input & Output Resistance (Ω)	350
Birdge Voltge, AC or DC (V)	3V(Recommended). 6V(Max)
Temperature Range (°C)	$-5 \sim +60$
Starting Force(g)	About 200

인장시험기의 기록장치 및 컴퓨터 세트는 로드셀로부터 얻어진 결과값을 데 이터 로거를 통하여 컴퓨터 모니터의 화면으로 확인할 수 있도록 한 장치이다. 시험값들은 데이터로거를 통해 모니터 화면으로 실시간으로 데이터와 그래프로 볼 수 있으며 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 또한 엑셀로 바로 변환이 가능하여 시험값의 해석에 있어 보다 더 편리하고 빠르게 사용할 수 있도록 제 작되었다(Table 2.7, Fig. 2.10).

Items	Description
Scanner Units	10 channels
Scan Speed	300ch/sec
Scan Time	100m/sec ~ 1/Hour
Test Kind	Temperature, Strain gauge, DC voltage
Program	Window 대응 한글Program
Application Gauge Resistance	$120\Omega$ or $350\Omega$
Application Gauge Type	120Ω - 1 gauge
	120Ω - 2 gauge
	$120\Omega$ or $350\Omega$ - 4 gauge
Bridge Voltage	2V DC
Direct Voltage	$\pm 20 \text{mV}, \ \pm 200 \text{mV}, \ \pm 2 \text{V}, \ \pm 20 \text{V}, \ \pm 50$

Table 2.7 Data logger specification



(a) Data logger



(b) Computer set



#### 2.2.2 기본이론

일축관입시험은 Chen(1970)의 양면편칭시험법을 개량하여 CBR(california bearing ratio)과 다짐시험을 활용하여 흙의 인장강도를 측정할 수 있도록 Fang and Fernandez(1981)에 의해 제시된 방법이다.

일축관입시험법에 사용된 이론은 Chen이 제안한 한계해석(Limit analysis)에 근거를 두고 있다. Chen(1970)은 완전소성이론을 이용한 한계해석으로부터 식 (1)과 같은 인장강도 계산식을 유도할 수 있음을 보여주었다. 원래 식(1)은 할 렬인장시험(Thompson, 1965)에 대한 인장강도 계산식으로 이 식의 이론적 기 본은 선형탄성이론에 바탕을 두고 있다(Timoshonko, 1934).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi L d} \tag{1}$$

여기서, σ<sub>t</sub> = 인장강도, P = 작용하중, L = 공시체 길이, d = 공시체 직경이 다.

한계해석에 근거하여 Chen(1970)은 양면펀칭시험법(Double punch test)을 만들어, 이를 이용하여 콘크리트와 암에 대한 지지력을 예측하는 방법을 개발하였다(Chen and Drucker, 1969; Chen, 1970). 여기서 한 가지 중요한 점은 콘크 리트에 적용된 똑같은 이론이 흙에도 적용이 가능하다는 것이다(Fang & Chen, 1972). 왜냐하면 콘크리트나 모르타르의 지지력 거동이 흙의 지지력거동과 매 우 유사하기 때문이다. 다만 일반적인 한계이론을 흙에 적용하기 위해서는 다 음과 같은 두 가지 가정을 만족해야 한다. 첫 번째 가정은 흙의 변형에 대한 것으로 흙은 완전소성체로 인장 및 압축 시 충분한 국부변형(Local deformabili -ty)이 발생하여야 한다는 것이다. 두 번째는 파괴기준에 관한 것으로 Fig. 3.1 처럼, 압축측면에서는 수정된 Mohr-Coulomb 파괴면이 인장측면에서는 적지만 영이 아닌 인장범위를 갖는 파괴면이 가정되어야 한다는 것이다. Fig. 3.1에서,  $q_u$ ,  $\sigma_t$ , c 및  $\phi$ 는 흙의 일축압축강도, 인장강도, 점착력 및 내부마찰각을 각각 나타낸다.



Fig. 2.11 Modified Mohr-Coulomb failure criterion

#### 2.2.3 파괴메카니즘

Fig 2.12는 원통형공시체에 대한 양면펀칭시험과 일축관입시험에 의한 이상 적인 파괴메카니즘을 나타낸 것이다. 방사선 방향으로 인장균열이 발생되어 있 으며 두 개의 콘 형태의 파괴면이 원반 바로 밑에 형성이 되어있다. 양쪽에 형 성된 콘 형태의 파괴면은 서로 강체처럼 이동하면서 콘 주위의 재료를 양 옆으 로 이동시킨다(Fig. 2.12(a)). 파괴메카니즘에 대한 속도벡터관계는 Fig 2.12(b) 와 같다. 콘 형태의 파괴면을 따라 각 위치에서 상대속도벡타(δ<sub>w</sub>)는 파괴면으 터 내부마찰각(φ)만큼의 경사를 가지고 작용한다. Δ<sub>R</sub>와 Δ<sub>D</sub>는 각각 상대속도벡 타(δ<sub>w</sub>)의 수평방향과 수직방향 성분이다. 에너지소멸율은 각 불연속면의 면적 에 인장강도 σ<sub>t</sub>를 곱하고 거기에 수평방향 속도벡타성분(Δ<sub>R</sub>)을 다시 곱해서 구 한다. 외부일률은 하중 P에 수직방향성분의 속도백터(Δ<sub>D</sub>)를 곱해서 구한다. 내 부에너지소멸율에 대한 외부일률(external work) 관계로부터 작용한 힘(P)에 대한 상한 값을 산출할 수 있다.

$$\frac{P}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin\phi}{\sin\alpha\cos\left(\alpha + \phi\right)} \frac{q_u}{2} + \tan\left(\alpha + \phi\right) \left(\frac{bH}{a^2} - \cot\alpha\right) \sigma_t \tag{2}$$

여기서 α는 미 확정된 콘형태 파괴면의 각도이고, a는 원반의 반지름, 그리고 b와 H는 각각 공시체의 반지름과 높이이다(Fig. 2.12).



Fig. 2.12 Cross section and velocity relation of the UP test

상한해는 최소값을 취하면 되는데  $\alpha$ 가 다음의 조건,  $\partial P_u / \partial \alpha = 0$ 을 만족해야 한다.

$$\cot \alpha = \tan \phi + \sec \phi \left[ 1 + \frac{\frac{bH}{a^2} \cos \phi}{\frac{q_u}{\sigma_t} \left(\frac{1 - \sin \phi}{2}\right) - \sin \phi} \right]^{1/2}$$
(3)

위 식(3)은  $\alpha \ge \tan^{-1}(\frac{2a}{H})$ 일 때 유효하며, 위 결과를 이용하여 식 (2)는 다음 과 같이 정리할 수 있다.

(2)  

$$P \le P_u = \pi (KbH - a^2)\sigma_t \tag{4}$$

식 (4)에서 K는 tan(2α+φ)로 식 (3)에서 볼 수 있는 것과 같이 내부마찰각 뿐만 아니라 압축-인장강도 비, 공시체-원반 체적 비에도 영향을 받는다.

Chen and Drucker(1969)가 내린 결론처럼 상한해(upper bound solution)는 정해값에 가깝다. 그러므로 모든 흙에 대한 양면펀칭시험에서 인장강도를 구하 는 하나의 식으로 다음 식이 타당하고도 볼 수 있다. 즉, 식(5)는 양면펀칭시험 에 대한 인장강도 계산식으로 활용할 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi (KbH - a^2)} \tag{5}$$

여기서, σ<sub>t</sub> = 인장강도, P = 작용하중, K = 계수 =tan(2α+φ), H = 공시체 높 이, a = 원반 반경, b = 공시체 반경이다. Fang and Fernandez(1981)은 Proctor 몰드 공시체를 사용한 경우 K = 1을 제시하였다(Table 3.1).

Table 2.8 Proposed values of parameter K in Eq.(5)

(Fang and Fe	ernandez.	1981)
--------------	-----------	-------

Size of specimen	K value		
Harvard miniature compaction mold(3.3×7.2cm)	$1.05 \sim 1.10$		
Proctor mold (10.2×11.3cm)	1.0		
CBR mold (15.2×17.8cm)	0.8		
Conditions :			
• Specimen-disc ratio : $0.2 \sim 0.3$			
• Height to diameter of specimen ratio : 0.46 $\sim$ 1.0			
• Rate of loading : ASTM recommendation for axial strain at			
a ration of 0.5 $\sim$ 2 percent of height per minute.			

#### 2.3 개량일축관입시험기(IUP test)의 개선점

다짐된 세립토의 정도 높은 변형특성과 인장강도를 측정하기 위해 주 연구 대상인 일축관입시험기(UP test)를 개량한 개량일축관입시험기(Improved Unconfined Penetrat -ion test, IUP test)의 개선, 보완점들은 다음과 같다.

#### 1) 편심제거

일축관입시험기에서는 흙 공시체 속으로 디스크가 관입하기 위해 공시체 위 와 아래 부분에 두 개의 디스크를 필요로 하는데 이 두 디스크의 정렬은 대단 히 중요하다. 기존시험기(Fig. 2.11(b))에서는 편심을 줄이기 위해 공시체 중앙 에 표시를 하여 공시체와 디스크를 정렬하였는데 하중축과 공시체간의 편심이 많이 발생하는 문제가 있다(Fang and Chen, 1972). 이것은 일축인장시험장치에 서 흔히 발견되는 문제인데 새로 개발된 시험기에서는 공시체를 놓는 밑판을 만들고 밑판에는 0.5cm 간격의 눈금을 설치하여 공시체가 밑판의 중앙에 쉽게 위치할 수 있도록 하였다. 하중축은 하중 프레임(Load frame)에서 일직선 상에 놓여지게 제작되어 밑판, 하중축, 공시체가 일직선으로 정렬되어 놓여진다.
### 2) 마찰, 응력집중, 미끄럼 제거

직접인장시험기의 경우 인장시키기 위하여 공시체의 일정부분을 잡아주게 되는데 이 경우 공시체와 기기의 접촉면에서 마찰과 응력 집중이 발생한다. 개량 일축관입시험기는 이러한 접촉부분이 없도록 제작하였다. 또한 밑판에 설치한 홈이 편심방지 역할과 함께 공시체의 미끄럼 방지 역할을 하도록 고안하였다.

#### 3) 측정오류 감소

변형률 및 응력 측정 오류는 대부분이 측정기기의 정확도에 관련된 것으로 정확도 높은 strain gauge(TCL-10F, 동아시험기, 오차범위 0.1%)와 load cell(DA-172 -100kg, 동아시험기, 오차범위 0.5%)을 선택하였다.

#### 4) 공시체 몰드

본 연구에서는 오염원에 대한 영향을 관찰하고자 오염된 혼합수를 사용하여 공시체를 제작하였으므로 공시체가 맞닿는 모든 시험장치 부품에는 오염원에 의한 영향이 적은 재질인 Stainless로 제작되었다.

#### 5) 다양한 크기의 하중재하 디스크

공시체에 직접 하중을 재하하는 디스크의 크기가 인장강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 하중재하 디스크를 12.7mm, 25.4mm, 38.1mm, 50.8mm 네 가 지로 준비하여 각각의 시험 시마다 교체하여 사용할 수 있도록 제작되었다.



(a) Load frame



(b) Base plate of load frame



(c) disks



# 제 3 장 시료의 공학적 특성

새로운 시험방법을 개발하기 위해 우리나라에서 가장 흔하게 볼 수 있는 화 강풍화토와 일반토질시험에서 많이 사용되는 주문진표준사 및 벤토나이트를 혼 합한 시료에 대하여 인장강도를 측정하였다.

### 3.1 화강풍화토-벤토나이트 혼합토

화강토는 세계 여러 지역에 분포되어 있으며, 우리나라에서도 가장 흔하게 볼 수 있는 흙이다. 화강토에 대한 연구는 광물학이나 암석학 분야에서 화강암 이나 그 풍화암의 조성광물의 분석부터 시작되어 점차 풍화잔적토에 대한 지반 공학적 연구로 이행되어 왔다. 이들에 대한 연구는 최초 조성광물의 1차 및 2 차 광물로의 변화를 추구하는데 있었으나, 松尾(1966), 西田(1970) 등에 의해 광 물학적 입장에서 지반공학적인 분야로 이용이 시도되었고, Lumb(1962), Murata and Yasufuku(1987) 등이 역학특성을 연구하기 시작한 이후, 오늘까지 많은 연구가 진행되고 있다.

흔히 현장에서 화강토는 성토재료나 기초지반으로서 양호하다고 인정되고 있 으나, 조성광물의 함유량과 풍화의 정도에 따라 그 공학적 성질이 크게 달라지 는 형태를 보이고 있으며, 대부분의 화강토는 통일분류법에 의하면 SM, SC 등 에 속하여 역학적 거동은 사질토나 또는 모래와 점토의 중간적 성격을 띠고 있 는 것으로 판단하고 있다. 이러한 분류적 성질 때문에 화강토는 그 토립자가 물리적으로나 화학적으로 불안정하여도 안정된 흙으로 간주되기 쉽고, 이와 같 은 점이 고려되어 현재는 특수토로 간주되고 있다(西田, 1970).

화강토는 겉보기에 고결상태에 있고, 단단해 보이지만 충격이나 기타의 교란 작용을 받으면 쉽게 입자가 분리되는 구조적 불안정상태에 있다(Brand & Phillipson, 1985). 이는 언급한 바와 같이 모암의 구성성분에 따른 풍화작용과 밀접한 관계가 있으므로 풍화작용의 성격과 풍화의 정도를 판단하여, 공학적 성질과 결부시키는 일은 매우 중요한 일이다(정진섭 & 양재혁, 2000).

본 연구에서 사용된 화강풍화토는 경기도 포천 지역에서 채취한 풍화잔적토 로서 10번체를 통과한 시료를 시험에 이용하였다. 자연상태의 화강풍화토 시료 와 벤토나이트를 소성지수가 15, 30이 되도록 조정하여 다른 비율로 첨가한 인 공의 시료들이 시험에 사용되었다.

### 3.2 모래-벤토나이트 혼합토

본 연구에서는 또한 폐기물매립지 점토차수재로 많이 사용되는 모래-벤토나 이트 혼합토를 이용하였다. 일반적인 매립지의 차폐시스템에는 HDPE, 부직포, 벤토나이트매트, 점토 등 다양한 강도와 변형 특성을 갖는 재료들이 사용되고 있다(Fig. 3.1). 이들 재료에는 차수막 상부에 작용하는 쓰레기의 하중과 차수재 의 자중으로 인해 인장력 또는 전단력이 발생한다. 또한 사면부 차수층은 바닥 부 차수층과 달리 쓰레기 하중으로 인한 일부응력은 지오멤브레인 등의 차수재 에 인장력으로 작용하므로 인장력에 의한 파괴에 대비하여 사면 상부에 정착을 실시하기도 한다(한국지반공학회, 2004). 본 연구에서는 이와 같은 점토차수재 의 인장강도를 측정하기 위하여 모래-벤토나이트 혼합토를 벤토나이트 중량 흔 합비율 5%, 10%, 15%로 혼합한 시료를 사용하여 실험을 실시하였다. 시료의 모래는 일반토질시험에서 주로 사용되는 압축강도시험용 주문진표준사(KSL 5100)를 사용하였고 벤토나이트는 국내 회사인 동양벤토나이트에서 제조한 벤 토나이트로서 몬트모릴로나이트(Montmorillonite) 함유량이 80% 이상이다. 점 토광물의 기본단위는 2가지 종류가 있는데 그 첫째가 Silica tetrahedron으로 Fig. 3.2(a)와 같으며 이것을 옆으로 계속하여 붙여놓은 것이 Silica sheet이다 (Fig. 3.2(b)). 둘째는 Alumina octahedron으로 Fig. 3.2(c)와 같으며 이를 옆으 로 붙여 놓은 것을 Octahedral sheet(또는 Gibbsite sheet)라고 한다(Fig.

3.2(d)). 이 2개의 구조를 위 아래로 어떤 비율로 조합하느냐에 따라 1:1 구조 (Silica sheet 하나에 Gibbsite sheet 하나), 2 : 1 구조(Silica sheet 두 개에 Gibbsite sheet 하나) 두 가지로 나뉜다. 몬트모릴로나이트는 대표적인 점토광 물중 하나로서 2개의 Silica sheet사이에 Gibbsite sheet 1개가 끼어 있는 2 : 1 의 기본구조를 이루며 Octahedral sheets에 있는 Al이 Mg으로 동형치환이 다 반사로 일어나게 되어 이 결정은 음의 전하를 가짐이 보통이다(Fig. 3.3). 이 기 본구조와 기본구조 사이에는 K<sup>⁺</sup>는 존재하지 않으며 구조사이에 물을 다량 흡 수하게 되므로 Montmorillonite는 단위질량당의 표면적이 800m²/g정도로서 음 의 성격을 심히 띠며(이, 2000), 물을 흡수함으로 인하여 크게 팽창하고 건조하 면 수축과 균열이 크게 일어난다(Fig. 4.4). 벤토나이트(Bentonite)는 몬트모릴로 나이트의 한 종류로서 폐기물매립지의 차수재뿐만 아니라 물을 흡수할 경우 크 게 팽창하는 성질을 이용하여 그라우팅(Grouting) 재료로 사용하기도 한다(권 외, 2004). 본 시료를 연구 시료로 선택한 이유는 Allen(2001)이 지적한 바와 같 이 매립지 차단시스템에서 균열이 발생하면 그 기능이 상실되어 오염원의 유출 이 발생되기 때문에 폐기물매립지 차수재로 많이 사용되는 모래-벤토나이트 흔 합토의 인장 균열 특성을 알아보기 위함이다.



Fig. 3.1 General landfill(Korean geotechnical society, 2004)



Fig. 3.2 Structural units of clay minerals(Lee, 2000)



Fig. 3.3 Atom structure of montmorillonite(Lee, 2000)



Fig. 3.4 Diagrammatic sketch of the structure of montmorillonite (Lee, 2000)

# 3.3 시료의 물성시험

본 연구에 사용된 시료의 물성치를 알아보기 위하여 다음과 같은 실험들이 실시되었다. 시료의 물리학적, 지반공학적 특징과 입자의 입도분포 결정은 모두 ASTM 시험방법에 준하여 시행되었다(김 외, 2002).

## 1) 비중(Specific Gravity)시험

시료의 비중을 구하기 위하여 비중시험(ASTM D 854-92)을 실시하였다.

Table 3.1 Specific gravity of materials

\ Materials	Granite-	Granite-	Granite-	Sand-	Sand-	Sand-
	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite
	mixture	mixture	mixture	mixture	mixture	mixture
	(Plastic	(Plastic	(Plastic	(containing	(containing	(containing
	Index	Index	Index	5% of	10% of	15% of
Property \	(PI)=0)	(PI)=15)	(PI)=30)	bentonite)	bentonite)	bentonite)
Specific						
gravity	2.69	2.63	2.61	2.61	2.58	2.57
$(G_s)$						

### 2) 아터버그한계(Atterberg Limit)시험

액체 상태로 변하는 최소 함수비인 액성한계와 소성상태에서 반고체 상태로 변하는 한계의 함수비인 소성한계를 구하기 위하여 아터버그한계시험(ASTM 4318-98)을 실시하였다.

Table 3.2 Atterberg limit of materials

\ Materials	Granite-	Granite-	Granite-	Sand-	Sand-	Sand-
	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite
	mixture	mixture	mixture	mixture	mixture	mixture
	(Plastic	(Plastic	(Plastic	(containing	(containing	(containing
	Index	Index	Index	5% of	10% of	15% of
Property	(PI)=0)	(PI)=15)	(PI)=30)	bentonite)	bentonite)	bentonite)
Liquid limit		36.3	10.2		30.48	47 31
(LL)			40.2		50.40	47.51
Plastic limit	ΝΡ	21.3	19.2	NP	16.93	22.88
(PL)	10.1.	21.0	10.2	11.1.	10.50	22.00
Plastic index		15	30		13 55	24.43
(PI)		10	50		10.00	24.40

## 3) 입도분석

시료의 입자크기 정도를 결정하기 위하여 체분석과 비중계분석(ASTM D



(a) Granite-bentonite mixtures



(b) Sand-bentonite mixtures

Fig. 3.5 Particle size distribution curve of materials

# 4) 다짐시험

시험 시료의 최대건조밀도와 최적함수비를 구하기 위하여 다짐실험(ASTM D 698-91, KS F 2312-91)을 실시하였다. 다짐실험에는 다음과 같은 방법이 있 으며 본 연구에서는 A다짐방법을 선택하였다.

Table 3.3 Summary of standard proctor compaction test specifications (Chun & Yoo, 2001)

	Weight of	Diameter of	Number of	Number of	Maximum
Method	hammer	hammer	layers of	blows per	allowable
	(kg)	(mm)	soil	layer	diameter(mm)
А	2.5	100	3	25	19
В	2.5	150	3	55	37.5
С	4.5	100	5	25	19
D	4.5	150	5	55	19
Е	4.5	150	3	92	37.5

Table 3.4 Maximum dry density and optimum moisture content of materials

Materials	Granite-	Granite-	Granite-	Sand-	Sand-	Sand-
	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite	bentonite
	mixture	mixture	mixture	mixture	mixture	mixture
	(Plastic	(Plastic	(Plastic	(containing	(containing	(containing
	Index	Index	Index	5% of	10% of	15% of
Property	(PI)=0)	(PI)=15)	(PI)=30)	bentonite)	bentonite)	bentonite)
$\gamma_{dmax} \ (g/cm^3)$	1.83	1.79	1.78	1.59.	1.61	1.62
O.M.C (%)	13.3	14.5	14.8	17.1	17.6	18.0

# 5) 투수시험

차수재로서 오염원에 대한 영향을 확인하기 위하여 선택된 시료인 모래-벤토 나이트 혼합토에 대해서는 차수재의 중요한 법적 기준인 투수계수를 확인하기 위하여 변수위 투수시험(ASTM D 2343-68)을 실시하였다. 실험결과 투수계수 가 차수재 조건인 10<sup>-7</sup>cm/sec와 유사하게 나타났다.

# Table 3.5 Coefficient of permeability of materials

Materials	Sand-bentonite	Sand-bentonite	Sand-bentonite
	mixture	mixture	mixture
	(containing 5%	(containing 10%	(containing 15%
Property	of bentonite)	of bentonite)	of bentonite)
Coefficient of			
permeability	$9.78 \times 10^{-7}$	$1.97 \times 10^{-7}$	$2.91 \times 10^{-9}$
(cm/sec)			

# 제 4 장 인장강도시험

### 4.1 시료준비

본 연구에 사용된 시료는 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토이다. 먼저 화강풍화토 시료는 경기도 포천 지역에서 채취한 풍화잔적토 로서 10번체를 통과한 시료를 시험에 이용하였다. 시료의 물리적 특성은 Table 5.1과 같다. 시험에 이용한 시료는 3종류로서 첫 번째 시료는 자연 상태의 화강 풍화토로서 통일분류상 SM이다. 다른 두 시료는 소성지수(PI)가 15, 30이 되도 록 벤토나이트를 조정하여 화강풍화토에 첨가한 인공의 시료로서 통일분류상 SC이다. 모래-벤토나이트 혼합토의 모래는 일반 토질시험에서 주로 사용되는 압축강도시험용 주문진표준사(KSL5100)을 이용하였고 벤토나이트는 국내회사 인 동양벤토나이트에서 제조한 벤토나이트로서 몬트모릴로나이트(Montmorillon -ite) 함유량이 80%이상이다. 시료는 모래-벤토나이트 혼합토에서 벤토나이트 중량혼합비율을 5%, 10%, 15%로 다르게 하여 균질한 상태로 혼합하여 준비하 였으며 시료의 특성은 Table 5.2와 같다. 벤토나이트 혼합비율이 5%와 10%인 혼합토는 통일분류상 SP-SC이며 벤토나이트 혼합비율이 15%의 혼합토는 SC 이다.

Plastic	Compa	Compaction		Atterberg Limit			
Index (%)	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	O.M.C (%)	Liquid Limit	Plastic Limit	(%)	Gs	USCS
0	1.83	13.3	N.P		40.65	2.69	SM
15	1.79	14.5	36.3	21.3	41.93	2.63	SC
30	1.78	14.8	49.2	19.2	46.68	2.61	SC

Table 4.1 Characteristics of granite-bentonite mixtures

Bentonite	Comp	Compaction		Atterberg Limit			
Mixing Rate	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	O.M.C (%)	Liquid Limit	Plastic Limit	(%)	Gs	USCS
5%	1.59	17.1	N.P		5	2.61	SP-SC
10%	1.61	17.6	30.48	16.93	10	2.58	SP-SC
15%	1.62	18	47.31	22.88	15	2.57	SC

Table 4.2 Characteristics of sand-bentonite mixtures

# 4.2 공시체 제작

공시체는 표준 Proctor mold를 사용하여 최적함수비 조건에서 3층 25회 다짐 으로 제작하였으며 최적함수비는 KS F 2312의 다짐시험방법 중 A 방법을 통 하여 얻어진 값을 사용하였다.



Fig. 4.1 Specimen preparation

# 4.3 시험방법

먼저 시료를 최적함수비 조건에서 A다짐(KS F 2312)으로 공시체를 준비한 다. 그 다음 단위중량 계산을 위하여 준비된 공시체의 무게를 측정한다. 인장시

험기에 같은 직경의 두 개의 디스크를 아래와 윗부분의 Load frame에 설치한 후, 디스크 중심과 공시체의 중심이 모두 일직선상에 정렬되도록 두 디스크 사 이에 공시체를 놓는다. 공시체가 올려진 밑판을 수평이 된 상태로 유지하며 위 로 올려준다. 이 때 공시체의 윗면과 Load frame의 윗부분에 설치된 디스크 면 이 거의 맞닿도록 하며 공시체의 아랫면 역시 아랫부분의 디스크 면과 거의 맞 닿도록 설치한다. 공시체 및 시험기기가 준비되면 분당 연직변형 재하속도를 달리하여 시험기기를 작동시킨다. Fang and Chen(1972)은 ASTM 규정에 따라 0.5 ~ 2.0%/min의 재하속도를 제시하였는데 본 연구에서는 0.5%/min보다 작 은 재하속도에서의 인장거동을 알아보기 위해 0.1%/min의 재하속도에 대해서 도 시험을 실시하였다. 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 경우 하중재하속도를 0.1%/min, 0.5%/min, 1.0%/min, 2.0%/min로 조절하여 시험하였고 모래-벤토나 이트 혼합토의 경우는 0.1%/min, 0.5%/min, 1.0%/min의 재하속도로 시험을 실 시하였다. 시험을 통하여 얻어지는 하중값과 변위는 데이터로거를 통해 컴퓨터 에 기록된다. 시료파괴 후 그 형태를 분석, 비교하기 위하여 디지털카메라로 촬 영을 하고 파괴된 시료를 노건조시켜 함수비를 측정한다. 각각의 공시체에 대 한 인장강도는 식 (5)에 의해 계산된다.

Plastic index, PI (%)	Disk diameters(mm)	Loading rates (%/min)
	12.7	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
0	25.4	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
0	38.1	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
	50.8	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
	12.7	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
15	25.4	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
15	38.1	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
	50.8	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
	12.7	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
20	25.4	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
30	38.1	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
	50.8	0.1, 0.5, 1.0, 2.0

Table 4.3 Test procedure of granite-bentonite mixtures

Table 4.4 Test procedure of sand-bentonite mixtures

Mixture rate of bentonite(%)	Disk diameters(mm)	Loading rates(%/m		%/min)
	12.7	0.1,	0.5,	1.0
5	25.4	0.1,	0.5,	1.0
5	38.1	0.1,	0.5,	1.0
	50.8	0.1,	0.5,	1.0
	12.7	0.1,	0.5,	1.0
10	25.4	0.1,	0.5,	1.0
10	38.1	0.1,	0.5,	1.0
	50.8	0.1,	0.5,	1.0
	12.7	0.1,	0.5,	1.0
15	25.4	0.1,	0.5,	1.0
10	38.1	0.1,	0.5,	1.0
	50.8	0.1,	0.5,	1.0

## 4.4 인장시험결과 및 고찰

#### 4.4.1 인장응력-변형률 관계

Fig. 4.2 ~ 4.7은 증류수를 사용하여 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토를 다짐하여 만든 공시체에 대하여 응력-변형률 관계를 나타 낸 결과이다. Fig. 4.2 ~ 4.7의 그림에서 모두 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토 모두 디스크 직경이 큰 경우는 상대밀도가 큰 모래의 거동과 같이 첨두강도 값이 뚜렷히 나타나고, 디스크 직경이 작은 경우는 상대 밀도가 작은 모래의 거동과 같이 첨두강도 값이 비교적 선명하게 나타나지 않 는 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 경우 소성지수가 높을수록. 모래-벤토나이트 혼합토의 경우 벤토나이트 혼합비 율이 많아질수록 보다 뚜렷하게 나타난다. 또한 화강풍화토-벤토나이트 혼합토 와 모래-벤토나이트 혼합토 모두 첨두인장응력을 살펴보면 디스크 직경이 커질 수록 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig 4.2에 나타난 소성지수가 0인 화강 풍화토의 경우 디스크 직경이 25.4mm ~ 50.8mm일 때 변형률 3 ~ 4% 내외 에서 첨두인장응력이 나타났으며 Fig. 4.3과 Fig. 4.4에서와 같이 소성지수가 15, 30일 때에는 변형률 3.5 ~ 4.5%에서 첨두인장응력이 나타났다. 모래-벤토 나이트 혼합토의 경우를 살펴보면 Fig. 4.5와 Fig. 4.6에서와 같이 벤토나이트 혼합비율이 5%, 10%일 때에는 디스크 직경이 25.4mm ~ 50.8mm일 때 변형률 2 ~ 3%에서 나타나고, Fig. 4.7에 나타난 벤토나이트 혼합비율이 15%의 혼합 토일 때에는 3 ~ 4%에서 첨두인장응력이 나타난다. 하지만, 화강풍화토-벤토 나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토 모두 가장 작은 12.7mm 직경의 디스 크의 경우 첨두강도가 뚜렷히 나타나지 않고 변형률 증가에 따라 인장응력이 점점 증가하는 경향을 보였다. 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이 트 혼합토 모두에서 디스크 크기가 작아질수록 응력-변형률 곡선이 완만한 형 상을 보였다.



(a) Loading rate : 0.1%/min



(b) Loading rate : 0.5%/min



(c) Loading rate : 1.0%/min



(d) Loading rate : 2.0%/min





(a) Loading rate : 0.1%/min



(b) Loading rate : 0.5%/min



(c) Loading rate : 1.0%/min



(d) Loading rate : 2.0%/min





(a) Loading rate : 0.1%/min



(b) Loading rate : 0.5%/min



(c) Loading rate : 1.0%/min



(d) Loading rate : 2.0%/min

Fig. 4.4 Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 30)



(a) Loading rate : 0.1%/min



(b) Loading rate : 0.5%/min



(c) Loading rate : 1.0%/min

Fig. 4.5 Sand-bentonite mixtures(containing 5% of bentonite)



(a) Loading rate : 0.1%/min



(b) Loading rate : 0.5%/min



(c) Loading rate : 1.0%/min

Fig. 4.6 Sand-bentonite mixtures(containing 10% of bentonite)



(a) Loading rate : 0.1%/min



(b) Loading rate : 0.5%/min



(c) Loading rate : 1.0%/min

Fig. 4.7 Sand-bentonite mixtures(containing 15% of bentonite)

#### 4.4.2 디스크의 영향

개량일축관입시험에서 디스크의 크기에 의한 인장강도의 영향은 Fig. 4.2 ~ 4.7에서 볼 수 있는 바와 같이 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이 트 혼합토에서 모두 디스크의 크기가 증가할수록 인장강도가 증가함을 알 수 있다. 디스크 크기 별 인장강도의 변화를 더 자세히 알아보기 위하여 12.7mm, 25.4mm, 38.1mm와 50.8mm의 4가지 다른 직경의 펀칭디스크를 사용하여 화강 풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토에 대하여 디스크 크기별 인장강도의 변화를 정리하였다(Fig. 4.8). Fig. 4.2 ~ 4.7에서 확인한 바와 같이 시료의 종류와 재하속도와 무관하게 모두 디스크 크기가 증가할수록 인장강도 가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 개량일축관입시험에서 정확한 인장 강도 값을 측정하기 위해서는 실험에서 적정한 디스크 크기를 선택하여야 한 다. 인장강도 계산(식 (5))에 있어 K = 1을 적용하였는데 이것을 사용할 수 있는 조건은 공시체 대 디스크의 직경비가 0.2 ~ 0.3이내이고 공시체 높이 대 직 경비가 0.46 ~ 1.0이면 어떤 크기의 공시체나 디스크를 사용할 수 있다고 제시 된 바가 있다(Fang and Fernandez, 1981). 또한 공시체가 파괴시 2 ~ 3개 정 도로 균열이 발생해야 K = 1을 적용할 수 있다고 하였다. Fig. 4.9는 개량일축 관입시험에 의한 공시체의 파괴형상으로 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공시 체 양단에 콘 모양의 형성과 함께 2 ~ 3개의 조각으로 균열이 발생함을 알 수 있다. 이러한 파괴 형상은 디스크 직경이 25.4mm ~ 38.1mm사이에서는 명확 히 나타났고 직경이 25.4mm보다 작거나 38.1mm보다 큰 경우에는 미약하게 나 타났다. 위의 결과를 정리하면 개량된 일축관입시험에서 표준 proctor mold를 사용하여 시료를 제작한 후 직경 25.4mm의 디스크 사용하여 인장강도를 측정 하는 것이 바람직하다고 판단되며 적용된 이론도 충족된다고 볼 수 있다.



(a) Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 0)



(b) Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 15)



(c) Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 30)



(d) Sand-bentonite mixtures(containing 5% of bentonite)



(e) Sand-bentonite mixtures(containing 10% of bentonite)



(f) Sand-bentonite mixtures(containing 15% of bentonite) Fig. 4.8 Variation of tensile strength to a disk diameter



Fig. 4.9 Failure modes of specimen in the IUP tests (Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 15))

#### 4.4.3 하중재하속도의 영향

일반적으로 다짐된 흙의 일축압축강도는 재하속도가 커질수록 증가하는 경향 을 보인다. Fig. 4.10은 하중재하속도가 인장강도에 미치는 영향을 검토하고자 화강풍화토-벤토나이트 혼합토에 대해서는 0.1%/min, 0.5%/min, 1.0%/min와 2.0%/min의 재하속도를, 모래-벤토나이트 혼합토에 대해서는 0.1%/min, 0.5%/min와 1.0%/min의 재하속도를 사용하여 인장강도시험을 실시한 결과이 다. 그립에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 시료들에서 디스크의 크기에 무관하 게 하중재하속도가 증가할수록 인장강도가 약간씩 증가하고 있다. 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 경우가 모래-벤토나이트 혼합토의 경우보다 재하속도에 따른 인장강도 증가 경향이 더 크게 나타났다. 하지만 앞서 본 디스크의 직경 에 대한 증가율보다는 그 변화량이 미약하며 특히 12.7mm의 작은 직경의 디스 크를 사용한 실험 결과는 하중재하속도에 따른 영향이 더욱 작게 나타났다. 이 와 같이 하중재하속도에 따른 인장강도는 큰 변화를 보이지 않으므로 개량된 일축관입시험은 ASTM의 일축압축강도시험에서 규정한 재하속도인 높이에 대 한 축변형률 0.5%/min ~ 2%/min를 사용하여도 무방하다는 것을 확인하였다.



(a) Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 0)



(b) Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 15)



(c) Granite-bentonite mixtures(Plastic index(PI) = 30)



(d) Sand-bentonite mixtures(containing 5% of bentonite)



(e) Sand-bentonite mixtures(containing 10% of bentonite)



(f) Sand-bentonite mixtures(containing 15% of bentonite)Fig. 4.10 Loading rate and disk diameter effects on tensile strength
#### 4.4.4 신뢰성 확인

개량일축관입시험(IUP)에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 본 연구에서는 화강 풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토에 대하여 할렬인장시험결과 를 실시하였다. Fang and Chen(1972)은 일축관입시험결과와 할렬인장시험결과 를 한 그래프에 함께 도시화 하여 비교함으로써 두 인장강도 값이 같음을 나타 낸 바 있다. Fig. 4.11은 본 연구에 사용된 혼합비율을 달리한 시료들의 개량일 축관입시험기를 통하여 얻은 인장강도와 할렬인장시험을 통하여 얻은 인장강도 결과값을 Fang and Chen(1972)의 결과 그래프에 함께 나타낸 것이다. 그림에 서 보는 바와 같이 개량일축관입시험결과는 할렬인장시험결과와 거의 일직선상 에 잘 분포하고 있었으며 이것은 본 연구에서 제시한 개량일축관입시험방법의 신뢰성을 입증한다. 다만, 소성지수가 0%인 벤토나이트를 혼합하지 않은 화강 풍화토일 경우에는 두 시험의 결과 값이 다소 상이하게 나타났는데, 여기에 대 해서는 차후에 보다 다양한 다른 재료들을 사용한 추가적인 실험을 통하여 연 구하고자 한다.



Fig. 4.11 Comparison of tensile strength of various materials determined by UP, Split tensile and IUP tests

## 제 5 장 오염원의 영향

#### 5.1 지반의 오염문제

산업사회의 고도 성장과 대량 소비문화의 발달, 그리고 인구의 도시 이동으 로 인한 거주지역의 밀집화 등으로 폐기물의 발생량이 해마다 증가되고 폐기물 의 종류도 다양화되고 있다. 이러한 증가추세에 있는 폐기물은 도시환경과 자 연생태에 막대한 영향을 초래하고 있기 때문에 고도의 대용량 처리기술이 요구 되지만 현재까지의 기술로는 문제해결이 어려운 실정이다. 폐기물 처리기술은 일반적으로 재활용, 소각, 매립의 세 가지 형태가 있는데 그 중에서 양적인 측 면에서 보면 매립처리하는 양이 소각재를 포함하여 전체 폐기물 발생량의 80% 가 된다(장 & 이, 2006).

이러한 국내의 현실에 있어서 위생매립지의 설계 및 시공의 기술 낙후는 엄 청난 지반오염문제를 야기시킬 수 있다. 건설기술연구원의 1996년도 보고서에 의하면 국내에 약 800여개의 불량매립시설이 존재하고 있으며 이로 인하여 현 재도 우리의 국토는 오염되고 있다. 한번 오염된 지반을 복원하는데는 천문학 적인 비용을 감수해야한다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다.

미국의 사례를 연구한 논문으로 미국 루이지에나대학의 토목환경공학과 교수 인 Acar가 1995년 Infrastructure 창간논문집에 기고한 것을 보면, 21세기에는 미국이나 통일독일의 연방국가예산 중에서 오염된 2,000여개의 오염지역을 청 소하는 비용이 국방예산과 마찬가지의 수위에 있을 것으로 전망했다(윤, 1996). 폐기물 매립장은 특별한 차폐시설 및 배수 처리시설이 없이 투기 매립될 경 우 지반오염을 일으키는 주오염원이 된다. 이를 방지하기 위하여 미국의 경우 HDPE와 같은 인공 합성 차수재와 다진 흙점토 차수재를 복합하여 일반 쓰레 기 매립장은 1겹, 유해 폐기물 매립장은 2겹으로 시공하도록 하고 있으며 하부 차수재와 비슷한 구조의 최종 복토시설을 설치하여 강우가 쓰레기 내로 침입 침출수화하는 것을 최소화하도록 하고 있다. 폐기물 매립장의 바닥부 차수시설 및 복토층 차수시설은 매립지에서 가장 중요한 시설로서 매립대상 폐기물의 종 류, 유해정도에 따라 최적의 차수구조체를 설계하며 국가별로 설치기준과 환경 보호에 대한 정책에 따라 다양한 차수방법을 채택하고 있다(Fig. 5.1, 5.2). 국내 폐기물관리법에는 일반폐기물 매립장의 경우 2.0mm(지정폐기물의 경우 2.5mm) 이상의 합성차수재를 1겹 이상 포설하고 하부에 투수계수 10<sup>-7</sup>cm/sec 이하의 점토 또는 벤토나이트 등의 차수재를 50cm(지정폐기물의 경우 1.0m) 이상을 포설하도록 되어 있다(환경부, 1999, 2001). 합성차수재 상부에는 투수계 수 10<sup>-2</sup>cm/sec, 두께 30cm 이상의 침출수 집배수층을 시설하여 발생한 침출수 를 신속히 배재하는 동시에 합성차수재 층을 보호하도록 하였다. 이러한 매립 장의 구조는 과거의 차폐시설 없이 처리하던 것보다 진일보한 것이기는 하지만 아직도 해결하여야 하는 다음과 같은 문제점이 있다.

매립된 폐기물은 화학오염물을 포함하는 침출수를 발생시키고 이러한 오염원 은 확산현상 등을 통해 외부로 빠져나가게 되어 점토차수재에 영향을 미치게 된다. 최근에는 폐기물 매립장의 차수시스템으로 토목섬유를 이용한 형태의 liner를 많이 시공하고 있는 추세이다(Fig. 5.3). 하지만 이러한 인공섬유의 경우 화학물질에 대한 저항력이 약하고 시공 시 작업 부주의에 의한 'wrinkle'현상이 발생되기 쉽다(Fig. 5.4, 5.5). 또한 아직까지 현장 시공특성을 고려한 접합성 평 가에 대한 특별한 규정이나 평가방법이 구체화되어 있지 않은 실정이라 토목섬 유를 차수시스템으로 사용한다하더라도 오염원의 유출을 완전히 차단하기는 힘 들다(한국지반공학회, 2004).

점토차수재의 품질관리에 있어서 주요 영향 인자는 흙의 종류, 점토의 함량 및 입경분포 그리고 점토의 소성 등이다. 흙은 오염물의 성분에 따라 강도 특 성 및 흙의 구조와 조성상태가 변질될 수 있는데(Ogata et al., 1982), Desai and Ahn(1995)은 모래와 벤토나이트의 혼합토에 NaCl을 추가한 흙에 대하여 강도시험을 수행하여 흙의 강도가 변화하는 것을 나타낸 바 있다. 오염된 간극 수는 전기 전도도, 부피변화, 압축성 그리고 전단강도에까지 영향을 미치게 되 어 모든 이온을 제거한 순수한 물일 경우와는 다른 흙의 거동을 일으킨다는 것 은 이미 널리 알려진 바이다(Evans and Fang, 1986; Naik, 1986; Meegoda and Rajapakse, 1993; Fernandez and Quigley, 1988). 또한, 최근 알려진 바에 의하 면 유기성 폐기물의 농도가 높을 경우 점토차수재는 이중층의 수축으로 인하여 투수성의 증가가 발생하는 것으로 보고 있으며 낮은 농도에서의 장기적인 안정 성도 충분히 입증되지 않았다(장 & 이, 2006). 지반공학적인 측면에서 흙 입자 크기는 차수재의 법적 기준인 투수계수에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 특 히, 차수재가 저투수성의 기능을 하도록 하는 세립분(<0.075m)의 입자 크기분 석은 더욱 중요하다할 수 있는데 이 세립분의 입도분포가 오염원에 따라 변화 하게 되면 저투수성의 성능을 잃게 된다.



- 68 -



Fig. 5.2 Composition of landfill cover system (Korean geotechnical society, 2004)



Fig. 5.3 Apply geosynthetic to solid waste landfill system (Korean geotechnical society, 2004)



Fig. 5.4 Wrinkle phenomenon of geosynthetic-clay liner connection by careless construction(Korean geotechnical society, 2004)



Fig. 5.5 Failed connection of geomembrane (Korean geotechnical society, 2004)

본 연구에서는 이 같은 문제점들을 줄이기 위해 차수재로 많이 사용되는 모 래-벤토나이트 혼합토에 대하여 차수재의 기능을 저해시키는 요인으로 작용하 는 오염된 침출수의 성분을 조사하고 특히 pH에 따른 차수재의 거동 변화를 규명하고자 한다. 또한, 차수시스템 내부의 온도 상승에 따른 균열패턴을 조사 하기 위해 오염원에 따른 균열양상도 함께 조사하고자 한다.

#### 5.2 폐기물 오염원의 종류와 특성

매립된 폐기물에서는 각종 오염물질이 존재하는 침출수가 발생하게 된다. 폐 기물의 성분을 동반한 침출수는 성분에 따라 환경오염의 정도와 우려기준이 다 른데, 일반폐기물 매립지와 산업폐기물 매립지에서 발생하는 폐기물의 성분은 다음의 Table 5.1, 5.2와 같다. Table 5.1의 일반폐기물 매립지 침출수의 경우 고형폐기물 매립장에서 발생되는 침출수가 생활폐기물 매립장에서 발생되는 침 출수보다 대부분의 성분 농도의 값이 큰 폭의 범위를 가졌으며 K, Mg, Ca, Na 의 성분이 다량 함유되어 있었다. 산업활동에 의해 발생되는 폐기물인 산업폐 기물의 경우는 산업활동 주체의 형태에 따라 조성성분이 아주 다양하게 나타나 는데 Table 5.2에 제시한 여러 가지 철강산업폐기물 침출수의 성분을 보면 유 해중금속들인 Cr, Cd, Pb, As이 포함되어 있음을 확인할 수 있었다. 이처럼 폐 기물은 종류와 지역에 따라 구성하는 물질이 매우 다양하며 구성 성분도 국부 적으로 큰 차이를 보인다. 이들 다양한 성분들이 점토 차수재의 거동에 미치는 영향을 개별적으로 모두 분석하고 검토하는 것은 매우 어려우므로 본 연구에서 는 pH에 대한 차수재의 영향만을 파악하고자 한다.

Table 5.1 Component and pH of leachate in municipal wastes landfill (Naylor et al., 1978)

	고형 폐기물 매립장	생활쓰레기 매립장	생활쓰레기매립장	
Determinant	(USEPA, 1973)	(Kunkel and Shade,	(Eavison, 1969)	
	(mg/L)	1976)(mg/L)	(mg/L)	
CaCO <sub>3</sub>	Nil-20,850	7,000-7,800	1,400-6,400	
BOD (5 day)	9-54,610	13,800-16,800	21-340	
COD	Nil-89,520	46,600-2,400	_	
Са	5-4,080	2,230 <sup>a</sup>	40-690	
Mg	16.5-15,600	727 <sup>a</sup>	70-308	
Na	Nil-7,700	1,440 <sup>a</sup>	390-1,600	
K	2.8-3,700	$680^{\mathrm{a}}$	240-800	
C1	34-2,800	1,325-1,375	360-1,800	
$SO_4$	1-1,826	265-411	10-350	
NH <sub>3</sub> N	Nil-1,106	336-340	140-990	
Fe	0.2-5,500	1,510 <sup>a</sup>	9-72	
pН	3.7 - 8.5	5.8 - 6.2	6.3 - 8.2	

<sup>a</sup>Average

Pb	(mg/L)	< 0.05	290.0	0.09	0.04	< 0.01	0.05	0.57	< 0.01
Zn	(mg/L)	6.8	2600	0.61	0.89	0.86	0.39	1.7	2580
				Desul	furization	slag			
	pН	6.45	5	10.86	11.02	10.2	10.0	9.3	5
As	(mg/L)	_	< 0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	_	0.01
Cd	(mg/L)	< 0.05	< 0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.05
Cr	(total)	< 0.05	< 0.1	< 0.04	0.01	< 0.05	0.01	< 0.05	< 0.05
Ni	(mg/L)	90.0	-	0.04	0.09	0.09	1.64	-	1036
Pb	(mg/L)	7.4	-	< 0.02	0.01	< 0.05	0.07	0.07	16.0
Zn	(mg/L)	< 0.05	0.7	0.02	< 0.01	< 0.01	0.20	0.20	9.0
	Blast Furnace dust								
	pН	12.50	5	12.59	12.52	_	12.8	11.7	5
As	(mg/L)	-	< 0.05	< 0.01	0.02	_	< 0.01	_	0.20
Cd	(mg/L)	< 0.05	0.05	< 0.01	0.02	_	< 0.01	< 0.05	0.04
Cr	(total)	31.4	17.0	31.0	71.0	—	29.9	16.0	4.0
Ni	(mg/L)	< 0.05	< 0.1	< 0.04	< 0.01	_	< 0.01	< 0.05	0.33
Pb	(mg/L)	13.3	< 0.1	16.0	23.6	_	1.5	11.2	< 0.01
Zn	(mg/L)	3.05	< 0.1	3.5	4.3	—	0.03	3.1	184.0
				Т	`ablet slag	ŗ			
	pН	11.9	5	12.57	12.18	11.50	12.5	11.0	5
As	(mg/L)	-	< 0.05	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	-	0.06
Cd	(mg/L)	< 0.05	< 0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.05	0.08
Cr	(total)	< 0.05	< 0.1	< 0.04	< 0.01	< 0.5	0.04	< 0.05	0.08
Ni	(mg/L)	< 0.05	< 0.1	< 0.04	< 0.01	< 0.1	< 0.01	< 0.05	< 0.01
Pb	(mg/L)	< 0.05	0.1	0.38	< 0.01	<1.0	0.01	< 0.05	< 0.01
Zn	(mg/L)	< 0.05	< 0.1	0.13	< 0.01	< 0.1	0.05	< 0.05	< 0.02
Converter dust									
	pН	11.87	5	11.75	12.25	11.80	11.5	_	-
As	(mg/L)	_	0.06	< 0.01	0.06	< 0.05	< 0.01	-	0.02
Cd	(mg/L)	0.05	0.22	< 0.01	0.03	< 0.05	< 0.01	_	< 0.01
Cr	(total)	68.0	45.0	69.0	170.0	84.8	54.2	-	36.0
Ni	(mg/L)	< 0.05	5.2	< 0.04	< 0.05	0.07	0.01	-	0.11
Pb	(mg/L)	< 0.05	0.1	0.45	5.4	< 0.1	0.04	-	< 0.01
Zn	(mg/L)	< 0.05	24.0	< 0.02	< 0.05	< 0.01	0.04	-	< 0.02

Table 5.2 Component and pH of leachate in industrial wastes landfill (Philipp et al., 1986)

## 5.3 시험 및 고찰

#### 5.3.1 비중계분석

모래-벤토나이트 혼합토 중 세립분(<0.075m)의 입도분석을 위해 비중계분석 (ASTM D 422-63)을 실시하였다. 비중계분석의 시험방법은 앞서 5장에서 설명 한 바와 같아 중복 언급하지 않겠으며 단 오염정도에 따른 입도분포의 영향을 확인하기 위하여 서로 다른 pH 농도를 가지는 물(pH 3, 6, 9)을 혼합수로 사용 하였다.

Table 5.3 Test procedure of hydrometer analysis with sand-bentonite mixtures

Containing rate of bentonite(%)	pH
5	3, 6, 9
10	3, 6, 9
15	3, 6, 9

Fig. 5.6에서 보는 바와 같이 각각의 혼합토들은 pH에 따라 입도분포가 변화 하여 나타났는데 이 같은 경향은 세립분인 벤토나이트가 많이 함유된 혼합토일 수록 크게 나타났다. 혼합수의 pH가 감소(염기성)함에 따라 침강속도가 느려져 크기가 작은 입자의 함유율이 높게 나타났으며 이것은 흙의 pH가 감소(염기성) 할수록 전기적, 화학적 작용력이 증가하게 되어 면모화 현상을 증가시킨 결과 라는 것을 확인할 수 있었다(한국토지공사, 1999). 점성토의 입자구조는 흙 입 자의 크기나 모양보다는 점토광물 특성과 점토 주위의 이중층수(Double layer water)의 특성에 따라서 좌우된다(이, 2000). 확산이중층(Diffuse double layer) 으로 둘러 쌓인 점토입자는 서로 가까워지면 확산이중층들이 서로 침투하려는 경향으로 인하여 입자들 사이에는 반발력이 생긴다(Fig. 5.7). 그와 동시에 점토 입자들 사이에는 반데르발스 힘(Van der Waal's force)에 의한 인력이 존재하 게 된다. 일반적으로 이중층의 두께가 얇을 때는 인력이 우세하고 두꺼울 때는 반발력이 우세하다(권 외, 2004). 점토의 이중층수의 반발력이 우세하면 모든 입자가 떨어져 있는 이산구조(Dispersive structure)가 되고 점토입자들의 모서 리(Edge)와 면(Face)사이의 강한 인력(주된 원인) 및 Van der Waals 인력에 의하여 입자들이 붙어서 면모구조(Flocculent structure)가 되기도 한다(Fig. 5.8). 비중계 분석의 결과 또한 pH가 감소(염기성)할수록 전기적, 화학적 작용 력이 증가되고 이에 따른 인력의 증가로 흙 입자의 구조가 면모화구조로 변화 한 것으로 추정된다. 이로 인하여 입자들이 부유하는 시간이 길어져 침강속도 가 느려지게 되고, 침강속도를 이용하여 입자크기를 결정하는 비중계분석의 결 과, 작은 입자의 함유율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 벤토나이트의 중량혼 합비율이 5%인 혼합토에서는 pH에 따른 경향이 일정하게 나타나지 않았는데 이것은 흙 시료 중 세립분의 양이 매우 적어 다소 오차가 생긴 것으로 추정된다.



(a) Sand-bentonite mixtures(containing 5% of bentonite)



(b) Sand-bentonite mixtures(containing 10% of bentonite)



(c) Sand-bentonite mixtures(containing 15% of bentonite)*Fig. 5.6 Effect of pH level on hydrometer analysis* 



Fig. 5.7 Diffuse double layer(Kwon et al., 2004)



## 5.3.2 인장강도 시험

다짐된 모래-벤토나이트 혼합토의 인장강도는 앞서 설명한 개량일축관입시험 방법(Improved Unconfined Penetraion test, IUP test)을 사용하여 측정하였다. 인장강도 시험방법 역시 4장에서 설명한 바와 같아 중복 언급하지 않겠으며 시 험에 사용할 디스크의 크기는 4.4절에서 확인한 바와 같이 가장 적합하다고 판 단된 25.4mm 직경의 디스크를 선택하여 수행하였다. 공시체 제작에 있어 오염 정도에 따른 인장강도 특성을 알아보기 위하여 서로 다른 pH 농도를 가지는 물(pH 3, 6, 9)을 혼합수로 사용하여 공시체를 제작하였다.

Table 5.4 Test procedure for IUP tests on sand-bentonite mixtures

Containing rate of bentonite(%)	pН	Loading rates(%/min)	
	3	0.1, 0.5, 1.0	
5	6	0.1, 0.5, 1.0	
	9	0.1, 0.5, 1.0	
	3	0.1, 0.5, 1.0	
10	6	0.1, 0.5, 1.0	
	9	0.1, 0.5, 1.0	
	3	0.1, 0.5, 1.0	
15	6	0.1, 0.5, 1.0	
	9	0.1, 0.5, 1.0	

Fig. 5.9에서와 같이 혼합수의 pH가 감소(염기성)함에 따라 인장강도가 조금 씩 감소함을 알 수 있었는데, 벤토나이트 혼합비율이 5%인 혼합토에서는 그 변화량이 미비하여 정확한 구분이 어려웠으나, 벤토나이트 혼합비율이 10%, 15%로 많아짐에 따라 pH가 감소(염기성)함에 따른 인장강도의 감소 폭은 크게 나타났다. 이는 흙의 면모화 현상의 증가로 간극비가 커지는 것에 의하여 인장 강도가 감소되는 것으로 보인다. 이와 같은 경향은 Naik(1986)가 지적한 pH 농 도에 따른 전단강도의 변화와 유사하다.



(a) Sand-bentonite mixtures(containing 5% of bentonite)



(b) Sand-bentonite mixtures(containing 10% of bentonite)



(c) Sand-bentonite mixtures(containing 15% of bentonite)

#### Fig. 5.9 Effect of pH level on tensile strength in the IUP test

### 5.3.3 균열패턴 관찰

차단시스템 내부의 온도는 화학적 작용에 의해 상승(50℃)하는데 이로 인한 건조 균열이 발생하고 있다. 균열의 양상을 간접적으로나마 확인하기 위하여 Fang(1997)이 제안한 균열 패턴 테스트를 실시하였다.

시험방법은 다음과 같다.

1 벤토나이트 중량 혼합비 5%, 10%, 15%의 모래-벤토나이트 혼합토를 대략
 50 ~ 100g정도씩 준비한다.

② 각각의 혼합토를 pH 3, pH 6, pH 9의 혼합수를 사용하여 액성한계(ASTM

4318-98)의 함수비로 반죽한다.

③ 시료에 혼합수를 넣어 반죽을 할 때에는 최소한 5분 이상 섞어주어 충분히 혼합되도록 한다.

④ 반죽된 시료를 유리판에 일정한 두께로 얇게 펴발라 20℃이상의 상온에서
 48시간 자연건조시킨 후, 그 균열의 모양과 특성을 관찰한다.



(a) Top view of dry mud pad



(b) Cross-section of dry mud pad

# Fig. 5.10 Preparation of wet mud pad for conducting cracking pattern tests

Table 5.5 Test procedure for cracking pattern tests on sand-bentonite mixtures

Containing rate of bentonite(%)	pH
5	3, 6, 9
10	3, 6, 9
15	3, 6, 9

앞에서 살펴본 비중계분석, 인장강도시험에서 모두 pH에 따른 차이는 벤토나 이트 혼합비율이 많아짐에 따라 크게 나타났으며 이를 확인하기 위하여 균열 패턴 테스트를 실시하여 균열모양을 관찰해 보았다. Fig. 5.11에서 보는 바와 같이 혼합수의 pH가 감소(염기성)할수록 균열이 보다 크게 나타남을 확인할 수 있었으며 이는 혼합토의 벤토나이트 함유량이 많아짐에 따라 더욱 확연히 관찰 되었다. 이것은 비중계실험, 인장강도시험과 동일한 경향을 나타낸다.

본 연구에서는 세립토의 함유량이 5 ~ 15%로 적은 양이라 pH가 흙시료에 영향을 미친다는 것을 확인하였을 뿐 큰 차이를 나타내지는 않았다. 하지만 차 수재가 저투수성 기능을 하기 위해서 인근지역이나 매립지 현장의 흙을 토취하 는 경우, 세립토의 함량이 39 ~ 50% 이상이 요구되는데(한국지반공학회, 2004) 세립분의 함유량이 많아질수록 오염원(pH)에 따른 영향을 많이 받는 것 으로 보아 실제 점토차수재가 오염원에 의해 받는 영향은 더욱 클 것으로 사료 된다. 이와 같은 입자구조의 변화는 흙의 구조와 관련된 많은 매개변수에 영향 을 미치게 되어 그 값을 변화시키게 된다(Table 5.6). 그러므로 순수한 물이 아 닌 다양한 오염성분의 오염된 물과 접하게 되는 지반환경구조물의 안정성을 판 단할 때에는 전단강도를 기초로 한 구조물전체에 대한 검토뿐만 아니라 이러한 오염원의 영향에 대해서도 충분히 고려되어야 한다.



(a) Sand-bentonite mixtures (containing 5% of bentonite)-pH 3



(b) Sand-bentonite mixtures (containing 5% of bentonite)-pH 9



(c) Sand-bentonite mixtures(containing 10% of bentonite)-pH 3 (containing 10% of bentonite)



(d) Sand-bentonite mixtures (containing 10% of bentonite)-pH 9





Fig. 5.11 Effect of pH level in pore fluid on cracking pattern



Major Factors	Soil Structures			
	Flocculation	Dispersive		
[1] Particle Arrangements	Face to edge	Face to face		
[2] Particle Structure	Flocculated structure	Dispersed structure		
[3] Physicochemical Properties				
(a) Electrolyte concentration	Increase	Decrease		
(b) Ion valence	Increase	Decrease		
(c) Dielectric constant	Decrease	Increase		
(d) Size of ion	Decrease	Increase		
[4] Environmental Factors				
(a) Temperature	Decrease	Increase		
(b) pH value	Decrease	Increase		
[5] Engineering Behavior				
(a) Hydraulic conductivity	High	Low		
(b) Compressibility	High	Low		
(c) Shear Strength	Low	High		
(d) Unit weight	Low	High		
(e) Crack openings	Large	Small		

Table 5.6 Comparison of basic parameters relating to soil structures (Fang et al., 2004)

## 제 6 장 결론

토공작업에 의하여 다져진 지반구조물에서 균열이 발생하게 되면, 초기 파괴 및 진행성 파괴를 유발할 수 있다. 이러한 균열을 파악할 수 있는 간단한 방법 은 인장강도를 측정하는 것이다. 하지만 흙의 인장강도는 압축강도에 비하여 그 값이 작고, 적합한 측정법의 결여로 인한 신뢰할 수 있는 데이터의 부족으 로 영에 가깝다고 생각하거나 무시하고 있다. 본 연구에서는 기존의 인장강도 시험방법 중 하나인 일축관입시험(UP)을 분석, 개선하여 흙의 인장강도를 측정 하는 새로운 개량일축관입시험법(IUP)을 개발하여 시험을 실시하였다. 또한, 개 발된 시험기를 이용하여 폐기물매립지의 점토차수시스템에 발생하게 되는 균열 에 대한 검토와 오염원이 세립토의 균열특성에 미치는 영향을 규명하고자 차수 재로 많이 사용되는 벤토나이트 혼합토를 이용하여 pH를 달리하여 여러 가지 시험을 수행한 결과 다음의 결론을 도출하였다.

- 본 연구에서는 신뢰할만한 흙의 인장강도 측정법이 없는 현재의 실정에서 기존의 인장시험장치와 비교하여 편심, 마찰, 응력집중 및 미끄럼 제거와 계 측기기 향상에 의한 변형률 및 측정 오류 등을 감소시킨 개량일축관입시험 법을 개발하였다.
- 증류수로 다짐된 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토
  의 응력-변형률 관계를 살펴보면 디스크 직경이 큰 경우 상대밀도가 큰 모
  래의 거동과 유사한 경향을 보이고, 반면 디스크 직경이 작은 경우는 상대밀
  도가 낮은 모래의 거동과 유사한 경향을 보인다.
- 3. 화강풍화토-벤토나이트 혼합토와 모래-벤토나이트 혼합토에 대하여 개량일 축관입시험을 통하여 디스크 크기별 인장강도의 변화를 정리한 결과 시료의 종류 및 재하속도와 무관하게 모두 디스크의 크기가 증가할수록 인장강도가 증가하는 경향을 보였다. 그러므로 개량일축관입시험에서 정확한 인장강도

값을 측정하기 위해서는 실험에서 적정한 디스크의 크기를 선택하여야 하는 데 인장강도 계산(식(5))에 있어 K = 1을 적용할 수 있는 조건과 공시체가 파괴시 2 ~ 3개의 조각으로 균열이 발생하는 조건을 모두 만족하는 25.4mm 직경의 디스크를 사용하여 인장강도를 측정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

- 4. 하중재하속도에 따른 인장강도의 변화를 정리한 결과 두 가지 혼합토 모두 에서 디스크의 크기와 무관하게 하중재하속도가 증가할수록 인장강도가 약 간씩 증가하였다. 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 경우 모래-벤토나이트 혼합토의 경우보다 재하속도에 따른 인장강도 증가 경향이 더욱 크게 나타 났으나 앞서 본 디스크 직경에 따 른 증가보다는 그 변화량이 미약하게 나 타났다. 이와 같이 하중재하속도에 따른 인장강도는 큰 변화를 보이지 않으 므로 개량일축관입시험은 ASTM의 일축압축강도시험에서 규정한 재하속도 를 사용하여도 무방하다는 것을 확인하였다.
- 5. 모래-벤토나이트 혼합토에 대하여 할렬인장시험결과와 개량일축관입시험결 과를 모두 수행하여 비교한 결과 거의 일직선상에 잘 분포하고 있었으며 이 것은 본 연구에서 제시한 개량일축관입시험방법의 신뢰성을 입증한다.
- 6. 모래-벤토나이트 혼합토를 사용하여 pH를 달리한 혼합수에 대한 비중계분 석을 실시한 결과, 차수재의 저투수성 기능을 하도록 하는 세립분의 입도분 포는 pH가 감소(염기성)함에 따라 침강속도가 느려져 크기가 작은 입자의 함유율이 높게 나타났다. 이것은 흙의 pH가 염기성으로 변화할수록 전기적, 화학적 작용력이 증가하게 되어 면모화 현상을 증가시킨 결과라는 것을 확 인할 수 있었으며 또한, 이러한 경향은 벤토나이트 혼합비율이 많아짐에 따 라 확연히 나타났다.
- 7. 혼합수의 pH가 감소(염기성)함에 따라 모래-벤토나이트 혼합토의 인장강도 가 조금씩 감소하여 나타나고 균열 모양도 상대적으로 보다 크고 뚜렷하게 나타났다. 이러한 경향은 벤토나이트를 많이 함유한 혼합토일수록 명확하게 나타났으며 이는 흙의 면모화현상의 증가로 간극비가 커진 것에 의한 것으

로 추측된다.

8. 차수재가 저투수성 기능을 하기 위해서 인근지역이나 매립지 현장의 흙을 토취하는 경우, 세립토의 함량이 39 ~ 50% 이상이 요구되는데 세립분의 함 유량이 많아질수록 오염원(pH)에 따른 영향을 많이 받는 것으로 보아 실제 점토 점토차수재가 오염원에 의해 받는 영향은 더욱 클 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

권호진, 박준범, 송영우, 이영생(2004), "토질역학"구미서관, pp. 33-39.

김광우, 이성훈, 서영상, 이문섭, 도영수(2002), "개질 샌드 아스팔트 혼합물의인장강도 연구", 대한토목학회논문집D Vol. 22 No. **3**.

- 김용필, 송용선, 이광열, 장용채, 정경환, 이대명(2002), "지반공학 시험법 및 응용"세진 사, pp. 28-39, 62-121, 166-203, 258-262.
- 박승범(2000), "토목재료실험", 문운당, pp. 26-30, 143-145.
- 양태선(2005), "도로제방의 균열발생", 한국지반공학회지.
- 윤길림(1996), "지반공학과 환경"일반기사.
- 이인모(2000), "토질역학" 새론출판, pp. 10-14, 42-44.
- 장연수, 이광열(2006), "지반환경공학", 구미서관, pp. 3-7, 107-122, 144-152.
- 정진섭, 양재혁(2000), "다짐화강토에 대한 다짐함수비와 입자파쇄의 영향", 대한토목학 회, pp. 269-279.
- 조태진, 이창영, 고기성(2004), "개착과정에서 인장균열이 발생된 동해고속도로 건설현 장 암반사면의 거동 해석", 한국지반공학회논문집 제 20권 8호, pp. 15-27.
- 천병식, 유한규 (2001), "토질실험 및 지반조사-실내·외 시험법과 그 결과의 이용-",

(주)건설연구사, pp. 95-102.

- 한국지반공학회(2004), "지반환경[폐기물 매립 및 토양환경]", 구미서관, pp. 6-9, 14-19, 61-61, 87-93, 133-134.
- 한국토지공사(1999), "연약지반의 압밀특성에 관한 연구", pp. 306-329.
- 환경부(1999, 2001), 폐기물 관리법.
- 松尾 捻, 經部大蔵(1966), 室内せん斷試驗結果 設計への適用に際する 2,3 の間題点 第 11回土質工學シシホシウム, pp. 98.
- 西田一彦(1970), マサ土の工學的性質とその取扱い指針基本的性質, 土質工學會マサ土研究 委員會, pp. 9-31.
- Allen, A.(2001), "Contaminant Landfills: the Myth of Sustainability", Engineering Geology, Vol. 60, pp. 3-19.
- Bishop, A. W. and Garga, V. K.(1969), "Drained Tests on London Clay", Geotechnique, Vol. 19, No. 2, pp. 309-312.
- Bofinger, H. E.(1970), "The Measurement of the Tensile Properties of Soil Cement",

RRL Report LR 365, 1970, Road Research Laboratory, Ministry of Transport, Crowthorme, Berkshire.

- Brand, E. W. and Premchitt, J.(1980), "Shape Factors of Cylindrical Piezometers", Geotechnique, Vol. 30, No. 4, pp. 369-384.
- Brand, E.W. and Phillipson, H. B.(1985), "Review of International Practice for the Sampling and Testing of Residual Soils", Scorpion Press, Hong Kong. pp. 7-21.
- Breen, F. F. and Stephens, J. E.(1966), "Split Cylinder Test Applied to Bituminous Mixtures at Low Temperatures", ASTM Jour. of Materials, Vol. 1, No. 1
- Chen, W. F. and Drucker, D. C.(1969), "Bearing Capacity of Concrete Blocks or Rock", Jour. of Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 955–978.
- Chen, W. F.(1970), "Extensibility of Concrete and Theorems of Limit Analysis", Jour. of Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. EM3, pp. 341-352.
- Conlon, R. T.(1966), "Landslide on the Toulnustone River, Quebec", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 3, pp. 113-144.
- Desai, C. S., and Ahn, T. B.(1995), "Effect of Chemical Transport on Seepage, Stress-Deformation and Stability Analysis of Soil Embankments", to be submitted.
- Evans, J. C. and Fang, H. Y.(1986), "Triaxial Equipment for Permeability Testing with Hazardous and Toxic Permeates", ASTM Geotechnical Testing Journal 9(3), pp. 126-132.
- Fang, H. Y. and Chen, W. F.(1972), "New Method for Determination of Tensile Strength of Soils", Highway Research Record 354, pp. 62–68.
- Fang, H. Y. and Fernandez(1981), "Determination of Tensile Strength of Soils by Unconfined-Penetration Test", ASTM STP 740, pp. 130-144.
- Fang, H. Y.(1997), "Introduction to Environmental Geotechnology", CRC Press LLC, pp. 169–177, 504–511.
- Fernandez, F. and Quigley, R. M.(1988), "Viscosity and Dielectric Constant Controls on the Hydraulic Conductivity of Clayey Soils Permeated with Water Soluble Organics", Canadian Geotechnical Journal, 25, pp. 582–589.
- Fang, H. Y., Daniels, J. L. and Kim, T. H.(2004), "Pollution Intrusion on Soil-Pavement System", ASCE Journal of Transportation Engineering(SCIE), Vol.

130, No. 4, pp. 526-

- George, K. P.(1970), "Theory of Brittle Fracture Applied to Soil Cement", Jour. of Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. SM3, pp. 991-1010.
- Irene Sarkar(2004) "The Role of the 1999 Chamoli Earthquake in the Formation of Ground Cracks", Journal of Asian Earth Sciences 22(2004), pp. 529-538.
- Kim, T.-H. and Sture, S.(2004), "Effect of Moisture on Attraction Force in Beach Sand", Marine Georesources and Geotechnology, Vol. 22, No, 1-2, pp. 33-47.
- Leonards, G. A. and Narain, J.(1963), "Flexibility of Clay and Cracking of Earth Dams", Jour. of Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 89, No. SM2, pp. 47–98.
- Lumb, P.(1962), "The Properties of Decomposed Granite", Geotechnique 12, No.3, pp. 226–243.
- Meegoda, J. N. and Rajapakse, R. A.(1993), "Long-term Hydraulic Cnductivities of Cntaminated Clays", ASCE Env. Engineering Journal, 119(4), pp. 725-743.
- Mikulitsch, W. A. and Gudehus, G.(1995), "Uniaxial Tension, Biaxial Loading and Wetting Tests on Loess", Proceedings of 1st International Conference on Unsaturated Soils, Alonso & Delages (eds), pp. 45–150.
- Murata, H. and Yasufuku, N.(1987), "Mechanical Properties of Undisturbed Decomposed Granite Soils", Proc, of the 8th Asian Regional Conference on SMFE, Vol. 1. pp. 193–196.
- Naik, D.(1986), "Effect of Temperature and Pore Fluid on Shear Characteristics of Clay", Proc. 1<sup>st</sup> international Symposium Environmental Geotechnology, 1, pp. 382–390.
- Naylor, J. A., Rowland, C. D., Young, C. P., and Barger, C.(1978), "The Investigation of Landfill sites", Water Research Center, Herts, England, pp. 68.
- Ogata, N., Yasuda, M., and Kataoka, T.(1982), "Salt Concentration Effects of Strength of Frozen Soils", Proc., 3th. Int. Symp. on Groudn Freezing, pp. 3-10.
- Perkins, S. W.(1991), "Modeling of Regolith Structure Interaction in Extraterrestrial Constructed Facilities", Ph. D. thesis, University of Colorado at Boulder.

- Philipp, J. A., Endell, R., Raguin, J. and Dechelette, W.(1986), "Leaching Test Characterization of Iron and Steel Industry Waste", Hazadous and Industrial SolidWaste Testing Disposal, sixth Vol., ASTM STP 933, pp. 7-27.
- Suklje, L.(1969), "Rheological Aspects of Soil Mechanics", Wiley-Interscie ncy, pp. 456-476.
- Spencer, E.(1968), "Effect of Tension of Stability of Embankment", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM5, pp. 1159–1173.
- Thompson, M. R.(1965), "The Split Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils", Highway Research Record 92, pp. 11-23.
- Timoshonko, S.(1934), "Theory of Elasticity", McGrw-Hill, New York, pp. 104-108.
- Tschebotarioff, G. P., Ward, E. and Dephilippe, A. A.(1953), "The Tensile Strength of Disturbed and Recompacted Soils", Proc, Third Internat. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., Vol. 3, pp. 207-210.
- Winterkorn, Hans F. (1955), "The Science of Soil Stabilization", HRB Bull, pp. 1-24.

# 감사의 글

어느덧 2년이라는 대학원생활이 지났습니다. 저에게 있어 연구실에서 보낸 2년 반이 란 시간은 많은 것들을 보고 듣고 느끼게 해준 기간이었습니다. 부족하게나마 이렇게 논문을 마무리하며 주위에 도움을 주신 분들에게 고마움을 전하고자 합니다.

철없는 저에게 대학원의 진학기회를 주셔서 새로운 전환점을 가질 수 있게 해주셨던 김태형 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 언제나 부족했던 저에게 많은 지도와 충고, 격려를 아끼지 않으셨던 교수님께 잦은 잔병으로 걱정까지 끼쳐드렸던 것 같아 송구스럽습니다. 그리고 대학교 입학 때부터 저에게 많은 가르침을 주신 김태곤 교수님, 김도삼교수님, 이중우 교수님, 김태형 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 실험을 끝까지 잘 마무리할 수 있도록 도와주신 대진대학교 김찬기 교수님과 현숙언니, 원범오빠와 언제나 편안하게 맞아주시던 서영교 교수님에게도 감사드립니다.

마음먹은 것은 언제나 해내고야마는 기천오빠, 언제나 친절하고 상냥한 정현오빠, 장 난심하고 말도 안 듣지만 힘든 일 생기면 스스로 도맡아하는 용수, 눈치 없긴 해도 무 엇을 하든 열심히 최선을 다하는 응기에게 고마운 마음을 전합니다. 또한 멀리 있어도 언제나 살갑게 챙겨주셨던 강기민 선배님과 이정우 선배님, 항상 본받고 싶은 변기준 차장님, 함께 생활하진 못했지만 많은 애정으로 실험실에 도움을 주셨던 이성철 선배님 께 감사드립니다. 그리고 언제나 나의 편이었던 나의 친구들과 항상 나에게 많은 힘과 용기를 가져다 준 가족들, 그리고 대학 동기, 선·후배님들께 감사의 마음을 전합니다. 마지막으로 변덕스런 저를 한결같이 보살펴주고 오랜시간을 함께 해주었던 민철오빠에 게도 감사의 말을 전합니다.

사회에 나가서도 항상 배우는 자세로 더욱 노력하여 저를 사랑해주시는 모든 분들에 게 발전해가는 모습을 보여드릴 수 있도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2007년 2월

정수정 드림